



EESTI MAAÜLIKOOL

Metsandus- ja maaehitusinstituut

**Andmar Piik**

## **Elektrikitarri valmistamine kasutades CNC- tehnoloogiat**

Manufacture of an electric guitar using CNC-technology

Lõputöö

Puidutöötlemise tehnoloogia õppekava

Juhendaja: Morten Poolakese

Kaasjuhendaja: Halvo Liivamägi

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Rakenduskõrgharidus lõputöö	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		lühikokkuvõte	
Autor: Andmar Piik		Õppekava: Puidutöötlemise tehnoloogia	
Pealkiri: Elektrikitarri valmistamine kasutades CNC- tehnoloogiat			
Lehekülgi: 58	Jooniseid: 46	Tabeleid: 2	Lisasid: 7
Osakond/ Õppetool		Metsakorralduse ja metsatööstuse õppetool	
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood:		T460	
Juhendaja(d):		Morten Poolakese, Halvo Liivamägi	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu 2021	
<p>Käesoleva rakenduskõrgharidusõppe lõputöö eesmärk oli tutvuda CNC valdkonnaga ning <i>Fusion 360</i> programmis luua elektrikitarri mudel ja välja töötada efektiivsed CNC töörajad, mis muudaksid elektrikitarride tootmise tõhusamaks.</p> <p>Lõputöös kirjeldatakse lühidalt CNC ajalugu. Kirjeldatakse kitarris tööstuses kasutatavat CNC tehnoloogiat. Selgitatakse CNC masina töötamise põhimõtteid ning näiteks tuuakse välja kolm peamist CNC liiki. Antakse ülevaade CNC masinate kasutatavatest tooriku kinnitustest ning erinevatest lõiketööriistadest. Tehakse lühiülevaade elektrikitarrist ning erinevatest kitarris komponentidest. Töö käigus põhjendati projektiks vajamineva materjali valikuid, kirjeldati kitarrikorpuse ja kaela välja lõikamist CNC masinaga ning nende kokku sobitamist. Antakse ülevaade kitarris kokkupanekust ning viimistlusest.</p> <p>Projekti käigus viidi CNC freespingil läbi mitmeid katseid kasutades erinevast materjalist toorikuid ning selgitati välja kõige efektiivsemad töörajad. Tulemustes selgus, et kõige efektiivsema tulemuse annab 5-teljeline töötlus, eriti kumeratel ja nurga all olevatel pindadel. Avastati, et kõiki süvendeid pole kasulik CNC masinas teha, kuna osade komponentide installeerimisel, tuleb detail käsitsi paika rihtida. Kokkuvõtteks võib öelda, et CNC tehnoloogia lihtsustab tunduvalt kitarris valmistamisprotsessi, kuid osad töötused tuleb siiski teha käsitsi.</p>			
Märksõnad: Fusion 360, toorik, 5-teljeline töötlus, lõiketööriistad, töörajad			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Professional Higher Education Thesis	
Author: Andmar Piik		Curriculum: Wood processing technology	
Title: Manufacture of an electric guitar using CNC-technology			
Pages: 58	Figures: 46	Tables: 2	Appendixes: 7
Department / Chair:		Chair of Forest Management Planning and Wood Processing Technologies	
Field of research and (CERC S) code:		T460	
Supervisors:		Morten Poolakese, Halvo Liivamägi	
Place and date:		Tartu 2021	
<p>The purpose of this thesis was to examine the CNC field and to generate effective CNC routings and the model of an electric guitar using Fusion 360 , what would make manufacturing of guitars easier.</p> <p>Thesis briefly describes the history of CNC. CNC technology used in the guitar industry is also described. Explaining the principles of CNC machining and pointing out three main types of CNC. An overview of various cutting tools and workpiece fasteners used in CNC machines. A brief overview of electric guitar and it's various components. Explaining the choice of used material, describing the cutting process of the body and neck. Giving an overview of the assembly and finishing of the guitar.</p> <p>During the project, several experiments were made on a CNC milling machine using blanks of different materials and the most efficient working paths were determined. The results showed that the most effective result is obtained with 5-axis processing, especially on curved and angled surfaces. It was found out that it is not recommended to make all the recesses through CNC machine, because when installing some components, the part has to be adjusted manually. In conclusion, CNC technology greatly simplifies the guitar manufacturing process, but some machining still needs to be done by hand.</p>			
Keywords: Fusion 360, routings, 5-axis processing, milling tools, material			

# Sisukord

SISSEJUHATUS .....	5
1. CNC .....	7
1.1. CNC lühiajalugu .....	8
1.2. CNC tehnoloogia kasutuselevõtt kitarride valmistamisel.....	9
1.3 Tööstuslike CNC masinate tüübid.....	10
1.4 Tööriistad ja detailide kinnitus .....	15
2. ELEKTRIKITARR.....	19
2.1. Kasutatud materjal ja puiduliikide kooslused.....	20
2.2. Soetatud kitarr komponentid, tutvustus.....	24
3. ELEKTRIKITARRI JA TEHNOLOOGIA KIRJELDUS.....	26
3.1. Fusioni töörajad .....	27
3.2. Postprotssessoriga G-koodi ülekandmine CNC pinki .....	42
4. ELEKTRIKITARRI VALMISTAMINE .....	42
4.1. Lõppviimistlus .....	44
KOKKUVÕTE .....	47
KASUTATUD KIRJANDUS .....	49
LISAD .....	51
Lisa 1. Elektrikitarri joonis .....	52
Lisa 2. Elektrikitarri joonis mõõtudega .....	53
Lisa 3. Elektrikitarri (body) joonis kõrvaltvaates.....	54
Lisa 4. Elektrikitarri (body) joonis tagantvaates .....	55
Lisa 5. Elektrikitarri (kael) joonis pealtvaates.....	56
Lisa 6. Elektrikitarri (kael) joonis kõrvaltvaate.....	57
Lisa 7. G-kood puurimise operatsioonist.....	58

## SISSEJUHATUS

Valisin käesoleva teema, sest viimasel ajal on üha enam suurenenud programmeerimise tähtsus tööstuste automatiseerimisel. Lisaks sellele on prioriteet lihtsustada tööprotsessi ning üheks suurimaks edasiminekuks industriaal valdkonnas on CNC tehnoloogia, mis võimaldab töödelda metalli, puitu, plasti, keraamikat ja muid komposiitmaterjale. Kuna CNC pink võimaldab toota identseid detaile, siis annab see eelise tootmisvaldkonnas ehk kergendab masstoodangut, kuna masin täidab mitme inimese tööd.

Rakenduskõrgharidusõppe lõputöö eesmärgiks on avastada erinevaid võimalusi seoses CNC valdkonnaga, laiendada silmaringi CNC masinatüüpide ehitusest, sealhulgas tootmisvõimalustest ning kasutusalaadest. Arendada inseneri moodi mõtlemist koostades detailsed tehnoloogilised joonised, tehes projektist pildid ning õppides CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) tarkvaras tööradu koostama. Õppida tundma erinevaid kitarriliike ja nende valmistamiseks kasutatavaid komponente. Viia kurssi end kitarride valmistamisel kasutatavate standard mõõtude ning muude parameetritega.

Lõputöö koosneb kahest osast: teoreetilisest ja praktilisest. Teoreetiline osa koosneb omakorda kahest peatükist ning praktiline osa tööst samuti kahest peatükist. Esimeses osas antakse lühiülevaade CNC tehnoloogiast. Teises osas tutvustatakse elektrikitarr ja selle komponente, nende tööpõhimõtteid ning selgitatakse lahti erinevate puuliikide heliomadused. Kolmandas osas tutvustatakse CAM tarkvaras loodud kitarr mudelit, tuuakse näiteid kasutatud CAM funktsioonidest, erinevatest võimalustest ning genereeritud tööradadest. Kirjeldatakse CAM parameetreid ning nende kasutusalasid. Visuaalseteks näideteks on koostatud joonistest kitarr 3D-mudel, kasutades selleks programmi CAD/CAM *Fusion 360*-t. Praktilise osa viimases peatükis kirjeldatakse detailselt, kuidas valmib elektrikitarr. Sinna hulka kuulub CNC pingist tulnud puitdetailide viimistlus, kitarrikomponentide installeerimine ning lõppviimistlus. Parema ülevaate saamiseks on kogutud pildimaterjal.

Rakenduskõrgharidusõppe lõputöö koostati projekti vormis. Selleks, et koostada 3D-mudel elektrikitarrist, pidi autor end kurssi viima CNC tehnoloogiaga. Sinna hulka kuulub CAD/CAM Fusion 360 tarkvara omandamine. Teema muudab aktuaalseks CNC kiire areng nii suurtes tööstustes kui tavakasutajate hulgas. Samuti külastades kitarripoode märkas autor, et müüdavate kitarride disain on lihtne ning kuju on kergesti ära tuntav. Samuti on autoril tulevikus plaan koostada oma ettevõtte, mis põhineb kitarride tootmisel ja müügil. Lähtudes sellest otsustati teha projektina elektrikitarr. Autor kasutas võimalust õppida CAM tarkvarasid ning ühtlasi on seotud teema puidutööstustehnoloogia erialaga.

CNC ehk arvprogrammjuhtimine on mehaaniliste tööriistade (nagu puurid, treipingid, freesid) ja 3D-printerite automaatne juhtimine läbi arvuti. CNC-masin töötleb vastavalt etteantud spetsifikatsioonidele materjali, järgides sisestatud masina tööradu ning kogu protsess vajab ühte inimest, kelleks on operaator (Cline 2015: 5).

CNC-masin koosneb mootoriga manööverdatav tööriistast ning sellele lisaks ka mootoriga manööverdatavast platvormist, mida juhib arvuti. Juhised edastatakse järjestikuste masinajuhtimisprogrammidenä CNC-masinale, milleks on G-kood. Mudeli ja selle tööradade genereerimiseks kasutatakse arvutipõhist töötlemise CAM tarkvara. Ka 3D-printerid kasutavad G-koodi. Põhiline erinevus CNC ja 3D-printerite vahel on see, et kui 3D-printerid loovad eseme nullist, siis CNC masin vajab toorikut, millest vajaminev detail välja lõigata.

Kitarritööstuses kasutatakse pillide valmistamiseks eelkõige lehtpuuliike. Sõltuvalt puiduliigist on igal puidul erinevad omadused ning sellega seoses on selekteeritud spetsiifilised puuliigid, mida kasutakse kitarride valmistamisel.

Autor tänab juhendajaid Morten Poolakese, Halvo Liivamägi ja Tõnis Teppand lõputöö juhendamise eest.

## 1. CNC

CNC (*Computer Numerical Control*) ehk APJ (arvprogrammjuhtimine) põhineb XYZ koordinaatsüsteemi. CNC operatsioonide puhul programmeeritakse masin tegema lõikeid kasutades tööradu. CNC tööradade genereerimisel kasutatakse spetsiifilist koodi, mida kutsutakse G-koodiks (Velling: 2020).

Nullpunktiks loetakse kohta, kus X-, Y- ja Z-telg omavahel ristuvad ning kõik teljed on omavahel täisnurga all. X ja Y koordinaadid määravad punkti asukoha pinnal ning Z asukohta ruumis. Spindel asub masinas Z-teljel, mis liigub vertikaalselt, kas masina töölauast üles (Z+) või alla (Z-). X-telg jookseb, sõltuvalt masinast, horisontaalis vasakule (X+) ja paremale (X-). Tööstuslike CNC pinkidega on Z-teljel võimalik teha ka diagonaalis liikumisi. 5-teljelised masinad võimaldavad seda ning hoiavad suurel hulgal aega kokku (Rattat 2017: 2-5).

Täpsete lõigete saavutamiseks, peab esiteks kindlaks määrama materjali asukoha tera suhtes. Kõik oleneb masinasse sisestatud tööradadest. Kui need on korrektsed, võimaldab CNC pink tänu sellele teha kiireid ja täpseid lõikeid. Tera liikumine masinas toimub eelnevalt läbi sisestatud G-koodi või läbi CAM tarkvara. G-kood ehk *post-processing* on programmi suhtluskeel. Samuti annab see masinale teada, kui kiiresti peab liikuma, mis materjali kasutatakse, kui tihe on toorik ja kuidas teostada lõpptöötlus (Cline 2015: 198). G-koodi saab kirjutada kas manuaalselt või kasutades CAM tarkvara. CAM tarkvara genereerib etteantud jooniste ning mudelite põhjal välja masinale sobiva tööraja.

CNC masinad on ülitäpsed ning varasemalt tehtud tööd saab uuesti teha ilma midagi muutmata nõ taaskasutatavad. Detailide salvestatakse, et neid hiljem uuesti kasutada. Selleks kasutatakse USB-pulka, mis sisestatakse CNC masina juhtpulti. Programmid on alati töökindlad, kuid seda ajani, kus mingisuguseid parameetreid programmis endas muudetakse, nt arvuti sisene uuendus. Programmis võib alati muudatusi teha (Velling: 2020).

CNC masinad vähendavad detailide lõikamise aega ja suurendavad tootlikkust. CNC masinaga identse detaili valmistamine võtab alati sama palju aega. Manuaalpink kasutades sõltub ajakulu operaatori oskustest ning kogemustest. Operaator peab programmi peale

laadima, seadistama masina, kinnitama materjali masinasse ning hiljem valminud detailid masinast eemaldama.

## 1.1. CNC lühiajalugu

Algeline versioon CNC tehnoloogiast tuli välja 1751. aastal, kus leiutati esimene treipink. See pani alguse CNC tehnoloogia arendamisele ning industrialiseerimisele (Prototechasia. 2020). Aastate jooksul on selle põhjal välja töötatud tuhandeid erinevaid masinate seeriaid eesmärgil luua mehaaniliselt täpsemaid toiminguid. Automaatika areng algas külma sõja ajal. USA merevägi esitas nõude ettevõttele “Parsons Works” suurendada helikopteri labade tootmisliini tootlikkust. Et seda nõuet täita pidi John T. Parsons varustama masina teljed mootoritega, mis muudaksid tootmise produktiivsemaks. Koostöös IBM-iga uuris ta nende masinate juhtimise võimalusi läbi arvuti. See oli CNC-masintöötluste lähtepunkt. 1952. aastal töötas Richard Kegg koostöös MIT-iga välja esimese CNC-freesmasina: Cincinnati Milacron Hydrotel. Viis aastat hiljem, 1958. aastal, esitati patent ning see pani alguse kaubandusele CNC tehnoloogia valdkonnas (Huang: 2021).

Kui külm sõda intensiivsemaks muutus, tekkis vajadus kiirendada CNC masinate produktiivsust, mis hõlmas eelkõige efektiivsust ning tootlikkust. Eesmärk oli kiirendada relvade väljatulekut. Lähtudes probleemist valmistas Richard Kegg koos MIT-iga 1952. aastal esimese CNC-freesmasina, mis oli tuntud kui Cincinnati Milacron Hydrotel.

CNC-töötlemine oli kogu maailmas üha enam tunnustatud. Selle põhjuseks oli arvutipõhine disain (CAD) ja arvutipõhine töötlus (CAM) 1972. aastal. CAD ja CAM kaasamine CNC-töötlusse viis CNC-töötlemise massiivse arenguni. Neid kahte ei peetud aga tootmisprotsessi standardseks osaks. 1976. aastal lisati CNC-töötlusse 3D arvutipõhine disain ja arvutipõhine töötlemine. 1989. aastal muutusid CAD- ja CAM-tarkvaraga juhitud masinad CNC-masinate tööstusstandardiks (Huang: 2021).



## 1.2. CNC tehnoloogia kasutuselevõtt kitarride valmistamisel

Kui kitarride käsitööna valmistamine on pillimeistrite seas ikka populaarne, on suuremad kitarritööstused üle läinud arvjuhtimisel põhinevale CNC tehnoloogiale. See võimaldab masstoodangut, täpsemalt säilitades paremini instrumentide kvaliteeti, suurendades tõhusust ja tootlikkust (WordDisk: 2020).

Enamik kitarritootjaid kasutab mudeli disainimisel mingit tüüpi 3D modelleerimist või CNC-tööstlustarkvara. CAD (*Computer Aided Design*) süsteemi kaks kõige sagedamast valikut on Autocad või Solidworks, mida kasutab nt Taylor Guitars ja Fender. CAD -i abil saab kitarriga kahe- või kolmemõõtmelise mudeli kujundada. See muudab disainiprotsessi lihtsaks ja käepäraseks. Kitarr on võimalik valmistada puidust, metallist, polümeerist või mingist muust töödeldavast materjalist. Näiteks alumiiniumist valmistatud kitarril puhul joonistatakse korpuse ülaosa, küljed ja tagumine osa modelleerimisprogrammi abil ning nende 2D funktsioonide kombineerimisel saab luua 3D-mudeli.

CNC tööradade genereerimiseks kasutakse CAM –tarkvara (*Computer Aided Manufacturing*). Selle jaoks kasutatakse tihti kahte CAD/CAM Fusion 360-t või MasterCAM-i. CAM-tarkvara kasutab CAD-süsteemis loodud 3D-mudelit ning edasi tuleb genereerida töörajad. Programmis on võimalik luua simulatsioonid olemasolevatest tööradadest, et veenduda tera korrektsetes liikumises.

CNC-töötlemise eeliseks on lõikamise kiirus ja täpsus. Tänu sellele on võimalik valmistada tuhandeid osi, mille tolerants ulatub kuni 0.01 mm-ni. See vähendab masstootmisel tekkivaid vigu ning aitab kitarre välimuselt identsemaks muuta. Samuti võimaldab see käsitöölisel oma tööd tõhusamalt ja kiiremini teha, kuna raskemad ja kriitilisemad lõiked on varasemalt masina poolt tehtud.

Eriti aegasäästlikuks muutub CNC töötlus sõrmlauda valmistades. Sõrmlaud on kitarril valmistamisel üks kõige raskemaid komponente. Sõrmlauda tuleb lõigata kindla vahemikuga sälgid (joonis 1), kuhu hiljem liimitakse spetsiaalsed traadid (*frets*). Lisaks tuleb kogu pealmine pind teha kumeraks. Kuna detail ise on õhuke on käsitsi sellise detaili valmistamine raskendatud on CNC sellisteks puhkudeks perfektne abivahend (WordDisk: 2020).



**Joonis 1.** Sõrmlaud sissesaetud sälkudega. (Autori foto)

### **1.3. Tööstuslike CNC masinate tüübid**

CNC-töötlust saab määratleda protsessina, mille käigus etteprogrammeeritud arvutitarkvara kontrollib tööriistade liikumist masinas. Seetõttu saab detaile kiiremini toota, vähendada jäätmeid ning välistada eksimuste riski.

CNC-masinaid on mõeldud nii tugevate kui pehmete esemete valmistamiseks ning need jagunevad kolmeks. Allpool loetletud masinate peal töötamine nõuab kogemust ning ruumilist mõtlemist. Tavakasutaja ei oskaks masinat korrektselt käsitleda ning ohustaks ennast ja teisi, kuna lõiketööriistade kiirused on tohutud. Kvaliteetsete detailide tootmiseks on vaja väljakoolitatud spetsialiste (Rattat 2017: 40-42). Kõik järgmised põhinevad G-koodil, mis on ühtlasi CNC-masinate suhtluskeel. Igat tüüpi CNC-masinaid vastavad kindlale otstarbele.



**Joonis 2.** CNC freespink Kafo (Universal technical institute...2020)

CNC-masinate üks levinumaid tüüpe on CNC-freespink (joonis 2), mida kasutatakse rohkem tugevamate materjalide töötamiseks nt metall ja puit. Masin suudab tõlkida spetsiifilisi numbrite jadasid, tänu millele saab freespingis spindlit mitmes asendis liigutada. Paljudel CNC freespinkidel käib töötus mööda X-, Y- ja Z-telgesid ning seda nimetatakse kolmeteljeliseks liikumiseks. Masinas saavad liikuda nii tera kui alus paralleelselt ning aluslauda peale kinnitatakse toorik. Aluslaud liigub ainult X- ja Y -telge mööda. Töölauda kohal asub sild, mis on suhteline Y-teljega ning mille küljes kelk. Kelk liigutab tera üles-alla mööda Z-telge. Kelgu küljes asub omakorda spindel.

Tööstuslikud freespingid kasutavad tööriistamagazine, kuhu on võimalik lisada kuni 36 erinevat tööriista. Magasinid on automaatvahetusega ning tera kinnitus toimub vaakumtõmmissaga. Selline funktsioon võimaldab teha mitut operatsiooni järjest.

CNC freespingil on lai valik funktsioone, nagu näiteks freesimine, puurimine jt. Enamik CNC-freespinke on kolme kuni kuue teljega. CNC-freespink on teiste masinatega võrreldes suur ning kulukas. Suurimad CNC freespinkide tootjad on Okuma, HAAS ja DMG Mori (Universal technical institute...2020).

Autoril oli privileeg töötada tööstuslikul CNC pingil JET Optima T5 (Joonis 3). Freespink on 5-teljeline, vaakumklambritega ja sellel on sisseehitatud tooriku fikseerimise funktsioon.



**Joonis 3.** CNC freespink JET Optima T5. (Autori foto)

CNC treipingid (joonis 4) on täpsuses üsna tõhusad võrreldes manuaalsete treipinkidega. Neil on sageli vähem telgi kui CNC-freesmasinatel ja seetõttu on need väiksemad ja kompaktsemad. Suurim erinevus freespingist on see, et pöörleb toorik, mitte tera. Lõiketööriist liigub mööda X telge ja vastavalt etteantud parameetreid edasi või tagasi. Treipingil on kaks telge, vertikaalne X ja horisontaalne Z. Tihti peale on lõiketööriist statsionaarne ning seda liigutab liikuv torn, mille külge on kinnitatud tööriist. Treipink tuleb kasuks, kui on tarvis sümmeetrilisi detaile. Tööstuslikel CNC treipinkidel on samuti automaatselt vahetuvad tööriistamagasinid. Lisaks sellele on masinas veel materjali sissetõujad ja detaili püüdjad, mis suurendavad tootlikkust. Tööriistamagasinid tuleb varustada vajaminevate lõikeriistadega ning vastavalt programmeerida, et ta kasutaks töötlemisel korrektset tera. Materjali sissetõuja on tavaliselt lisaseade treipingile, kuid võimsamatel tööstuslikel treipinkidel on see üks osa treipingist. Materjali sissetõujasse sisestatakse vastavate parameetritega toorikud ning töötamise käigus lükkab seade need teatud intervalliga masinale töötlemiseks ette. Kui detail treipingis valmis saab, lastakse sellel kukkuda detaili püüdjasse. (Universal technical institute...2020)



**Joonis 4.** CNC treipink Haas (Universal technical institute...2020)

Suur erinevus freespingist on töölauda puudumine masinast. Treipingi puhul kinnitatakse detail pöörlevate tsentrite külge hoides selle võrra rohkem ruumi kokku. Mõned levinumad CNC treipingi tootjad on HAAS, Mori Seiki ja Okuma. CNC treipinkide raamistik sarnaneb manuaalsete treipinkidega.

CNC ruuter (joonis 5) on masin, millel on palju sarnasusi freespingiga, mida kasutatakse samade materjalide lõikamiseks. Seda tüüpi CNC-masinaid võivad aidata terase, puidu, alumiiniumi, komposiitide, plasti ja vahtmaterjali lõikamisel (Cline 2015: 175-176).



**Joonis 5.** CNC ruuter Style CNC (Universal technical institute...2020)

CNC ruuter sarnaneb CNC freesipingiga, kuna see on mõeldud eelkõige arvutiga juhtimiseks. Nagu CNC freespink on ka ruuter tavaliselt 3-teljeline. Veel on olemas multifunktsionaalsed ruuterid, mis on suutelised tegema ka 5-teljelisi lõikeid, kus lisaks X, Y ja Z-telgedele on kaks lisapöörlemistelge C ja B. CNC ruuterite tootlikkus on võrreldes teiste CNC masinatega kõige suurem. Ruuteriga töötades väheneb materjalikulu ning suureneb tootlikkust, tootes erinevaid esemeid palju lühema aja jooksul kui teisi masinaid. Samuti sobivad ruuterid suurepäraselt projektide jaoks, täpsemalt prototüüpide ja keerukate kujunduste loomiseks (Universal technical institute...2020).

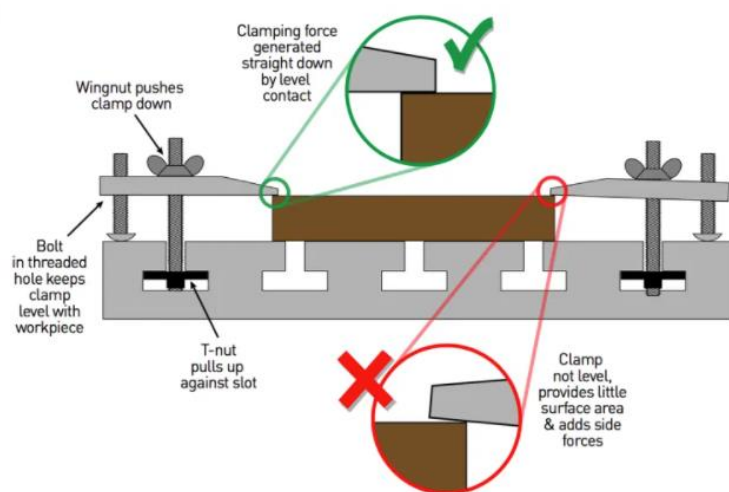
CNC Ruuteril ja freespingil on sarnane töölaud. See koosneb tavaliselt kahest komponendist: aluslauast ja lauast. Laud on sageli alumiiniumist või metallist, kuhu on freesitud sooned õhu liikumise reguleerimiseks. Aluslauaks sobib kas mõni puitlaastplaat (joonis 6), MDF-tahvel või mõni muu õhku läbi laskev materjal, sest muidu ei püsiks töödeldav materjal paigal. Aluslaud kaitseb alumiiniumlauda tera eest. Freesimisel lõikab tera töödeldavale materjalile kontuuri, et detailid materjali küljest hiljem saada kätte. Et tagada korrektne lõige on vahel vaja lõigata aluslauda. Selline nähtus on sage masina 5 –teljelisel liikumisel. Aluslauda sisse lõigates ei juhtu teraga midagi, kuid alumiiniumi ja metalli puhul võib freesi tera puruneda. (Rattat 2017: 8-9)



**Joonis 6.** Aluslaud/rakis. (Autori foto)

## 1.4. Tööriistad ja detailide kinnitus

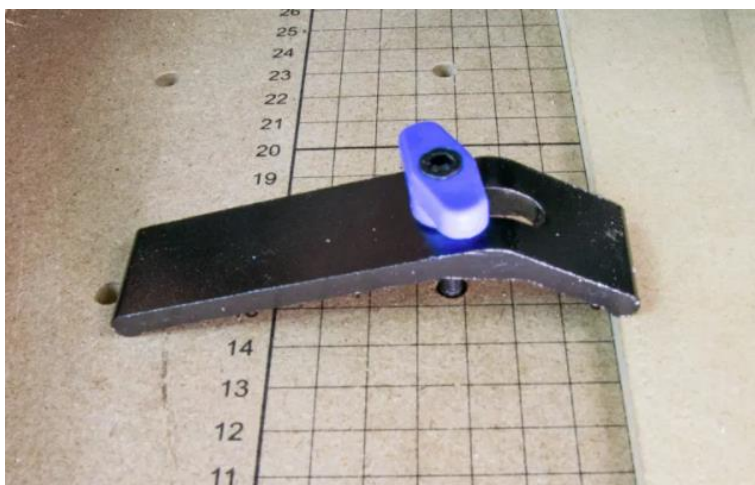
CNC-masina tööpind võib olla tasane, kuid tihtipeale on tööpinda sisseehitatud sooned. Kõige sagedamini kasutatakse T- kujulist soont (joonis 7). Sinna saab sisestada polte, klambreid ning muid kinnitusvahendeid. Metallitööstuses kasutatakse laialdaselt detaili fikseerimiseks pakkide vahele kinnitamist. Väntvõlliga versiooni puhul pannakse toorik kahe paki vahele ning need keeratakse omavahel kokku. Metalltööstustuses peab olema detail tugevalt fikseeritud kuna töötatakse suurte kiirustega võib kas detail või tera masinast läbi lennata. On olnud juhtumeid, kus tera lendas läbi masina ning läbi töökoja seina. Sellepärast peab operaator hoolikalt veenduma tooriku kinnituses. Klambreid on eritüüpi ning igaühel neist on omad eelised. Klambriid peavad vastu üllatavalt suurele vastujõule. Valesti joondatud klambriid võivad põhjustada probleeme, isegi defekte, juhul kui need on valesti paigutatud. Tasase pinnaga klambriid tuleb asetada toorikul samuti tasasesse kohta. Kui klamber asetseb nukiti, eriti vastu detaili serva, on klambri efektiivsus kavandatust väiksem ning võib isegi konstantse rõhu all liikumisele kaasa aidata. Klambri tagaosas olev polt või muu tugi on reguleeritud nii, et klamber oleks koormuse all horisontaalne (Deagan 2017).



**Joonis 7.** T- kujulised sooned, tööpõhimõte (Deagan 2017).



Tera liikumisel peab arvestama, kas lõikus toimub läbinisti või mitte. Lõigates läbinisti on kasulik kasutada eraldi rakist, mille peale asetatakse toorik. Nii saab kindel olla, et tera aluspinda sisse ei lõika. Tähelepanu peaks pöörama sellele, kas väljalõigatav detail võib pärast kontuuride lõikamist toorikus liikuda või mitte. Kasutades laia diameetriga terasid võib see loksuvasse detaili sisse lõigata ning seda isegi minema lennutada. Paljudes CAD-programmides on võimalik kasutada sellist funktsiooni nagu *Tabs*. Need on väikesed lõikamata piirkonnad, mis asetsevad kontuurivahele ning fikseerivad detaili toorikus.



**Joonis 8.** Kinnitusklamber (Deagan 2017).

Mõned klambrid on disainitud hoidma detaili ainult servaga (joonis 8). Töölaud pakub tagant klambritele toetuspinda ning tänu sellele on neid võimalik kasutada nurga all.

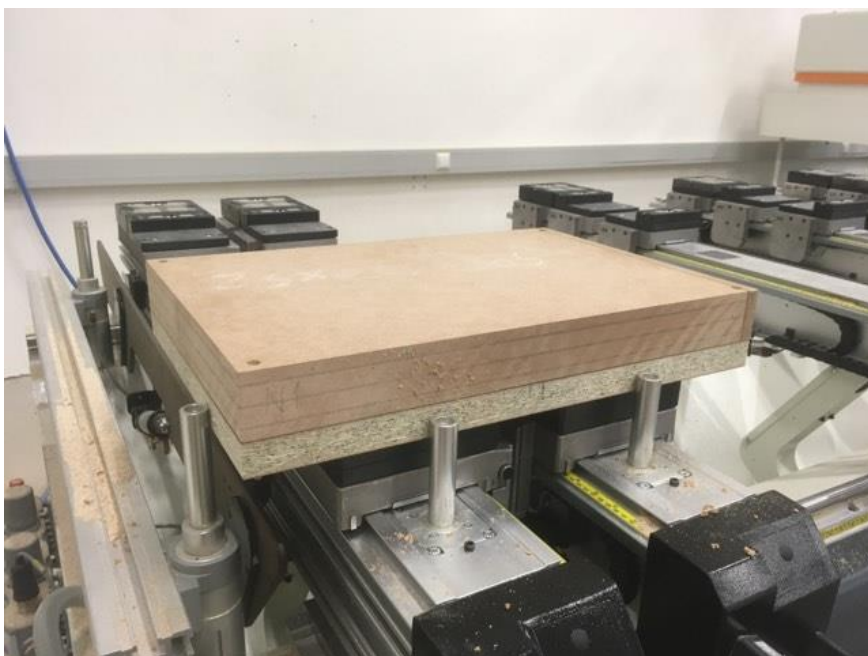
Paljudes tööstuslikes CNC freespinkides kasutatakse vaakumklambreid (joonis 9). Selline kinnitus on laialdaselt levinud mööblitööstus, kuna puit on poorne materjal ning kinnitub efektiivselt. Töölaua pinnal on kanalid, mille kaudu tõmmatakse detail vaakumisse ning keskel asub sensor. See kinnitab tooriku lõikusperioodiks ning vabastab selle kiiresti ja ilma probleemideta. Selliseid kinnitusi kasutas autor lõputööd tehes.





**Joonis 9.** Vaakumklamber. (Autori foto)

Autor kasutas lõputööd tehes CNC freespink JET Optima T5. Masin tõukab välja metallvardad ning toorik asetatakse nende vastu (joonis 10). Tänu sellele saab täpse tooriku paigutuse ning selline funktsioon hoiab aega kokku.



**Joonis 10.** Metall varrastega tooriku fikseerimine. (Autori foto)

CNC masinatel on tohtul hulgal erinevaid tööriistu, kuid kõige rohkem kasutatakse puure ning freese. Kõiki lõiketööriistu on erineva kuju, disaini ning parameetritega. Puur on mõeldud otse tooriku sisse puurimiseks. Freesid on jällegi mõeldud külje pealt materjali eemaldama. Freesid lõikavad kogu külje ulatuses mitte ainult otsaga. Enamik freese on tsentreeritud keskele ning nendega saab nii freesida kui puurida. Mitte tsentreeritud freeside kasutamisel tuleb algselt avad ette puurida, kuna nendel freesidel pole tsentris lõiketera.

Freesimisel kasutatakse paljusid erinevaid freesiterasid:

- 1) V-kujulistel freeside otsikutel on lõikeprofiil V tähe sarnane. Mõnele neist on lisatud lisa-nurgad, oleneb tahetavast profiilist. 90-kraadine tera teeb laiema süvendi ning sobib paremini suuremate detailide lõikamiseks. 60-kraadine nurk võimaldab teha sügavamaid lõikeid ning lõigata väiksemaid detaile Samuti kasutatakse seda otsikut tähtede sisse graveerimisel (Rockler 2020).
- 2) Laupfreese kasutatakse pinna puhastamisel materjalist. Kasutades laiema diameetriga otsikut nt 12mm on võimalik eemaldada korraga suureskoguses materjali, mis kiirendab töötusprotsessi märgatavalt.
- 3) Faasifreese kasutatakse ümarate servade saamiseks ja samuti ka üleminekul. Neid on eri suurustega ning kõige populaarsemad on 30, 60, 90, 120-kraadised terad.
- 4) Spiraalotsikud lõikavad sirgelt, kuid teral on veel spiraalsed vaod, mille eesmärk on laastud töödeldavast süvendist välja juhtida. See on kasulik kui lõigatakse puitlaast plaati või MDF- tahvli, kuna saepuru tolmu tekib detaili peale kuhjaga. Kui tera töötleb saepuruga täitunud kohas liiga kaua võib hõõrdumisel säde tekkida, mis võib tulekahju tekitada. Üldjuhul kasutatakse spiraalotsikuid taskute ning süvendite tegemisel, kontuuri lõikamisel, soonte freesimiseks ning puurimiseks, nii et need on üsna vajalikud otsikud (Rockler 2020).

## 2. ELEKTRIKITARR

Elektrikitarr on kitarr, millel on vaja välist võimendust selleks, et oleks tavapärastes tingimustes kuulda heli. See kasutab ühte või enamat helipead, et muuta keelte võnkumine elektri signaalideks, mille arv on omakorda suurendatud läbi võimendi. Heli on võimalik kujundada või elektrooniliselt muuta, et saavutada erinevad tämbrid või tooni kvaliteet, tehes selle akustilisest kitarrist üsna erinevaks. Tihtipeale on see saavutatud läbi efektide nagu näiteks “reverb”, “distortion”, “overdrive”. Viimane neist on peaelement kitarrimängus nii “blues”-is kui rokis. (How Products are Made...2006)

Elektrikitarr on leiutatud 1932. aastal ning selle võtsid omaks eelkõige jazz-i kitarrimängijad, kellel oli tahtmine suurtel bändikohtumistel ühe noodi kitarrimängu esitada. Esimesed kitarrimängijad olid Les Paul, Lonnie Johnson, Sister Rosetta Tharpe, T-Bone Walker ja Charlie Christian. 1950-1960 aastatel kerkis elektrikitarr kõige tähtsamaks instrumendiks populaarses muusikas. Aegade jooksul on kitarre täiustatud ning sellest on saanud instrument, mida kasutatakse igas muusika žanris, põhiliselt tänu võimendile.

Võimendi töötab põhinedes kitarrist tulevate helisignaalidele, see muundab heli vastavalt etteantud režiimile (mode`ile). Lisaks režiimile on võimalik muuta ka mitmesuguseid teisi heli parameetreid, seda tänu helipeadele, korjates nõu heli keelte pealt üles ning neid võetakse ühtlasi ka eri kohtade pealt. Tänu sellele on võimalik muuta nt Low režiimi, mis lisab helile raskust, muudab alumised keeled intensiivsemaks. Lisaks sellele on Medium ja High režiim, mis töötavad samal põhimõttel, kuid tõstavad esile eri keeli. Gain on helisignaali taseme tõstmiseks, lisab võimsust.

Elektrikitarrimängu disain ja konstruktsioon põhineb suuresti kitarrimängu keha kujul, samuti kaela, silla ning helipeade seadistustest. Kitarrimängu võib olla fikseeritud sild või vedruga hingedega sild, mis võimaldab kitarrimängijatel keeli üles-alla painutada ehk teisisõnu helikõrgust üles või alla painutada sealhulgas vibratoefektid. Elektrikitarrimängu heli saab muuta erinevate tehnikate kasutamisega, nagu näiteks keelte painutamine mööda Z-telge, keelte mängimine ilma otseselt keeli tõmbamata (hääled tekivad vaid keelte peale vajutamisega sõrmlaua piires) koputamine ja löömine, kitarrimängu keeltest tsüklisse jäänud heli ehk teisisõnu tagasiside kasutamine või “slaid” kitarrimängu mängimine (kasutatakse vasaku käe sõrmel metallist silindri kujulist abivahendit, mis tekitab unikaalse heli).

Elektrikitarr on mitut tüüpi, sealhulgas: fikseeritud kerega kitarr; erinevat tüüpi õõnsa kerega kitarrid; kuuekeeleline kitarr (kõige tavalisem tüüp), mis on tavaliselt häälestatud E, B, G, D, A, E kõrgematelt madalamatele keelpillidele.

Pop- ja rokkmuusikas kasutatakse elektrikitarr sageli kahes rollis- rütmikitarrina, mis mängib akordijärjestusi või progresseerumisi (akordidega spetsiifilisel teel mööda helistikku kõrgemale liikumine) ja *riff*-e (kitarril mängitud helilõigud, lahenemised jne) ning seab takti (rütmilõigu osana) Peale selle on peakitarr, mis toetab vajadusel vokaali, ilustab kindlaid helilõike, ning lisab instrumentaalseid soolosisid. Rock- ja metalbändides on sageli rütmikitarrist ja peakitarrist (How Products are Made...2006).

## 2.1. Kasutatud materjal ja puiduliikide kooslused

Kogemuseta töötamine CNC pingil tähendab seda, et tihtipeale kasutatakse tööradade korrigeerimisel katse-eksituse meetodit. Sellise meetodi puhul kulub väga palju toorikuid, mistõttu on kasulik valida võimalikult odav materjal. Odavaimaks katsetusmaterjaliks on penoplast. Odavamat katsetusmaterjali ei leidu kui penoplast. Katsetuste käigus selgus, et suure tihedusega penoplastil (*styrophone*) (joonis 11) oli pinnakvaliteet märgatavalt halvem kui keskmise tihedusega penoplastil. Kaela tooriku tegemisel pidi tooriku paksust tõstma (standard paksus on 50 mm). Selleks lõigati vastavate parameetritega penoplast ribad, mis kinnitati toorikule vahtplastiga.



**Joonis 11.** Penoplastist kitarrikorpuse toorik. (Autori foto)



**Joonis 12.** Penoplastist kitarrikaela toorik. (Autori foto)

Järgmise tooriku materjal tuleb samamoodi valida võimalikult odav, kuid selle eesmärk on imiteerida puidu omadusi. Selleks sobivad kas vineer, MDF (joonis 13), või puitlaastplaat (Rattat 2017: 163) Tugevama materjali puhul ei paindu materjal tera eest ära ning tulemus on CNC pingis täpsem. Lõputöö raames valiti selleks materjaliks MDF tahvel. Tooriku paksus saavutati liimides 19 mm paksused tahvlid omavahel kokku. Hiljem lasti toorik paksusmasinast läbi, kuid seda ei soovitata teha halva pinnakvaliteedi tõttu.



**Joonis 13.** Kitarrikorpuse toorik (MDF-tahvel). (Autori foto)



Elektrikitarri valmistamisel võib kasutada mitmeid erinevaid lehtpuu liike nt sangleppa, mahagoni, pärna, Koa-puud, vahtrat, pähklipuud, roosipuud jne. Nende kasutamine sõltub sellest, missugust kõla valmistaja kitarrist soovib. Igal puuliigil on teatud heliomadused, mõned puuliigid (sanglepp) lasevad paremini läbi kõrgemaid ja mõned (mahagoni erinevad liigid) madalamaid helisid. Autor kasutas kitarr korpuse valmistamisel sangleppa ja mahagoni (joonis 14) Kaasjuhendaja Halvo Liivamäe sõnul tekitavad need kaks puuliiki maheda kõla, kuid saab ka mängida kõrgemas registris ilma probleemideta.



**Joonis 14.** Kitarrikorpuse toorik, mahagon/sanglepp. (Autori foto)

Suur ajakadu tekkis kaela tooriku korrektse paksuse saavutamiseks. Puitmaterjal soetati AS MASS-st, kus standardpaksus on 50 mm. Seega tuli lõigata 7 mm ribad formaatsael ning hiljem niiskuskindla PVA-ga kokku liimida. Kuna kitarril ulatus nii sügavale ainult kitarripea (*headstock*), polnud vajalik terve kaela ulatuses paksust tõsta (joonis 15).



**Joonis 15.** Kitarrikaela toorik, vaher. (Autori foto)

**Tabel 1.** Toorikute mõõdud

Nr	Tooriku kasutus	Tooriku materjal	Tooriku mõõdud, mm		
			Pikkus	Laius	Paksus
1	Korpus	Styrophone	520	350	50
2	Korpus	Styrophone	520	350	50
3	Kael	Styrophone	800	350	57
4	Kael	Styrophone	800	350	57
5	Korpus	MDF	520	350	50
6	Kael	MDF	800	350	57
7	Korpus	Sanglepp/mahagon	520	350	50
8	Kael	Vaher	800	350	57

## 2.2. Soetatud kitarri komponendid, tutvustus

Elektrikitarril on palju komponente ning igaüks neist täidab kindlat tööpõhimõtet:

- 1) Häälestajad (*tuners*) ja tihvtid müüakse komplektina. Nende eesmärk on vastavalt soovile keeli pingestada. Keelte pingestamisel, kõrgemate helida saavutamiseks, keeratakse komponenti vastupäeva, kui soovitakse madalamaid helisid, siis päripäeva. Keeratav osa on kinnitatud tihvti külge, mille külge on keritud kitarri keel. (Dempsey: 2020)
- 2) Elektrikitarridel, millel on häälestaja augud ainult ühes ääres, kasutatakse sageli ülemiste keelte puhul keelte painutajat (*string tree*). Selle eesmärk on keeli juhtida võimalikult kaelapea (*headstock*) lähedalt.
- 3) Rihma kinnitused on metallist naastud, mille külge kinnitatakse rihm. On olemas ka rihmalukk, mis pakub täiendavat tuge.
- 4) Kaela fikseerimiseks kasutatakse metallplaati, mille nurkades on 4 kruvi või poldiava ning kinnitamisel on see nagu suur seib, mis ühtlustab kinnituskohale mõjuva pinge.
- 5) Alumine sadul ehk *bridge* on komponent kuhu kinnitatakse keeled. Autor kasutas lõputöö tegemisel tremolot, mis täidab sadula ülesannet, kuid lisab funktsiooni, läbi mille on võimalik painutada kõiki keeli korraga. See annab unikaalse heliefekti. Paljudel elektrikitarridel saab sadula kõrgust reguleerida, mis omakorda muudab keelte ja sõrmlaua vahelist kaugust.
- 6) Tüüpilised elektrikitarril helipead ehk *Pickup*-id on elektromagnetilised ning koguvad tänu nende magneetilistele omadustele keeltelt tulevat heli. See kandub elektrilise signaalina võimendisse. Elektrikitarridel on sageli rohkem kui üks helipea. See on sellepärast, et keeltel on erinevates kohtades erinev toon ning tänu sellele saab helipea intensiivsust reguleerida, mis tekitab eri toone. Helihead liigituvad kaheks, passiivseteks ja aktiivseteks ning mõlemal on omakorda veel erinevaid versioone. Heliheadede selekteerimiseks (*selector switch*) on tehtud lüliti, mis võimaldab mängimise ajal nende vahel vahetada.
- 7) Keelte tugipunktiks on ülemine sadul ehk *Nut*. See on tehtud tavaliselt loomade luudest, kuid tehakse ka grafiidist. *Nut* on risttahukas kuhhu on sisse viilitud 6 või enam vahet, sõltuvalt keelte arvust ning keeled tõmmatakse sealt läbi. Kitarriskaala on



alumisest kuni ülemise sadulani ning see on kitarriehitusel kõige tähtsam parameeter. Vale kitarriskaala puhul kitarr ei häälestu.

- 8) Helitugevuse ja tooni juhtnupud asuvad kitarrikorpusel, tavaliselt helipeade lähedal. Need reguleerivad helitugevust ning tooni. Toon tõstab vastavalt vajadusele esile kas madalamaid või kõrgemaid keeli.
- 9) Kitarril pistikupesa ehk *jack socket* on koht, kuhu ühendatakse pistikukaabel.
- 10) Pinge-latt ehk *trussrod* paikneb kaela sees ning on asetseb kerge kurvi all. Selle ülesanne on pakkuda vastukoormust keelte suhtes. See on reguleeritav ning lihtsasti isetehtav. (Dempsey: 2020)

**Tabel 2.** Soetatud komponendid

Nr	Detaili nimetus	Koduleht kust detail soetati	Hind, €
1	Gotoh SD91-05M MG-T Locking 6L B	Thomann UK	70
2	Graph Tech PT-7004-00 String Tree	Thomann UK	9
3	Fender Original Strap Buttons	Thomann UK	7
4	Fender Neck Plate Vintage Plain Chrome	Thomann UK	12.80
5	Gotoh Wilkinson VS100N-HC Tremolo	Thomann UK	99
6	CTS 500;250 kOhm potentiometers; Seymour Duncan SH-JB Hot Rodded Humbucker; 3 way switch, standard output	madhatterguitar	310
7	Fender Pre-Slotted Nut f.Strat/Tele	Thomann UK	22.90
8	Stratocaster vintage back plate 4ply red pearl BP-313-PR	customworldguitarparts	8.95
9	5 mm keermelatt	Tööriista market	6
10	Kuumuses kokku tõmbuv plastikkate	Tööriista market	2
11	4 x poldid, kokkutõmmatavad	Lasita Maja	6

### 3. ELEKTRIKITARRI JA TEHNOLOOGIA KIRJELDUS

Elektrikitarri projekteerimist alustas autor Cad/Cam Fusion 360 programmis. Kõige pealt määrati paika kitarriskaala pikkus, mis oli 648 mm. Elektrikitarridel on 5 põhilist skaalat: 610, 622, 628, 635, 648 mm. Disainimisel tahtis autor anda kitarrili agressiivsema kuju, mis lisaks pillile iseloomu. Kitarri valmistamine toimus enamuse ajast katse-eksitus meetodi läbi. Autor koos lõputöö juhendajatega katsetas erinevaid lõikemeetodeid ning lõiketööriistu, kuni leidis, millised töörajad ja otsikud vastavad normidele.

Detailide valmistamiseks kasutati tööstuslikku CNC freespinkki JET Optima T5 (Joonis 16), mis on mõeldud eelkõige puidu ja plasti töötlemiseks. Freespink on 5-teljeline, vaakumklambritega ning sellel on sisseehitatud tooriku fikseerimise funktsioon. Masinal on automaatselt vahetuv tööriistamagasin, kuhu saab korraga paigaldada kuni 36 erinevat tööriista. Viis telge võimaldavad teha mitu operatsiooni järjest. Diagonaallõiked võimaldavad kaldpindu freesida.



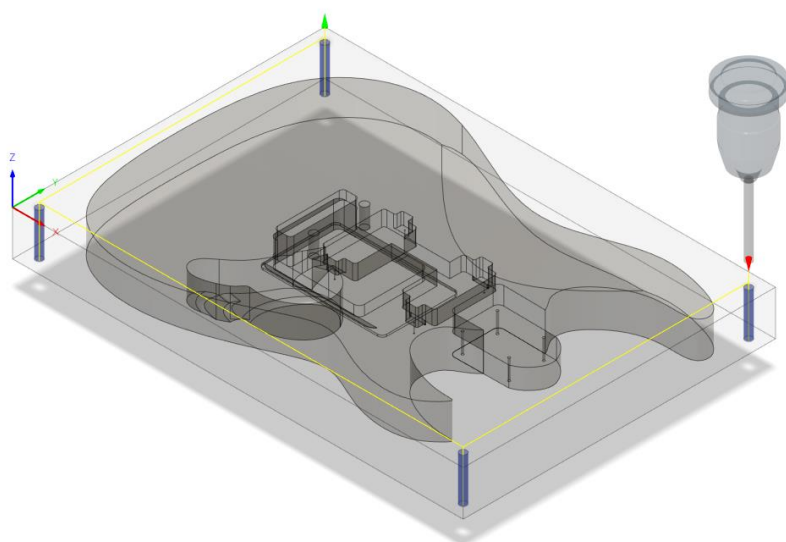
**Joonis 16.** CNC freespink JET Optima T5. (Autori foto)

Elektrikitarr koosneb kolmest puitdetailist: korpus, kael ja sõrmlaud (Lisa 1-5) Korpus ja kael moodustavad koos nõ kitarri skeleti (*guitar skeleton*). Kitarri sisestatavad komponendid on välja toodud tabelis 2. Sõrmlauda autor ei valmistanud, kuna selle tegemine nõuab aastatepikkust kogemust ja vilumust. Sõrmlauda tegi valmis lõputöö kaasjuhendaja Halvo Liivamägi.

### 3.1 Fusion 360 töörajad

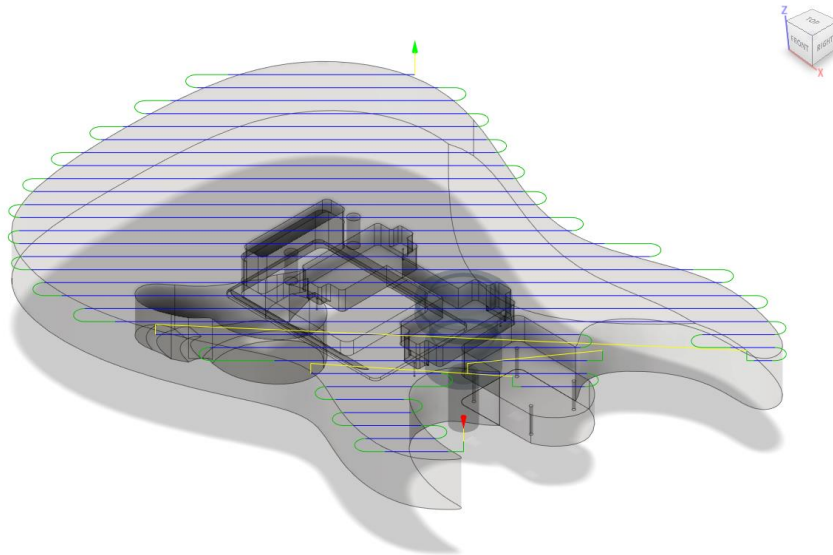
Tööradade koostamisel peab arvestama paljude asjadega. Selleks et töödelda toorikut mõlemalt poolt tuleb see vahepeal masinas teistpidi keerata. Alguses töödeldakse korpuse toorikut nii pealt (joonis 26) kui alt (joonis 32) ning pärast kaela toorikuga samamoodi. Kui detailid on valmis sobitatakse kael korpusega, et kontrollida reaalseid parameetreid (joonis 43, 44). Samuti pööratakse suurt tähelepanu ajafaktorile. Projekti algul oli autoril plaanis kasutada enamus lõigetel 6mm laupfreesi, kuid hiljem CAM-i simulatsioonist kontrollides selgus, et töötlemisaeg tuli seitse tundi. 6mm otsiku asemel võeti kasutusele 12 mm tera, mis vähendas ajakulu märgatavalt.

Selleks, et kinnitada toorik rakise külge, puuritakse 6,5-7 mm otsikuga sümmeetriliselt paiknevad poldiaugud (joonis 17). Et tagada ohutu tera liikumine süvendatakse toorikusse poldi peade augud, kuna hiljem lastakse kontuuri faas.



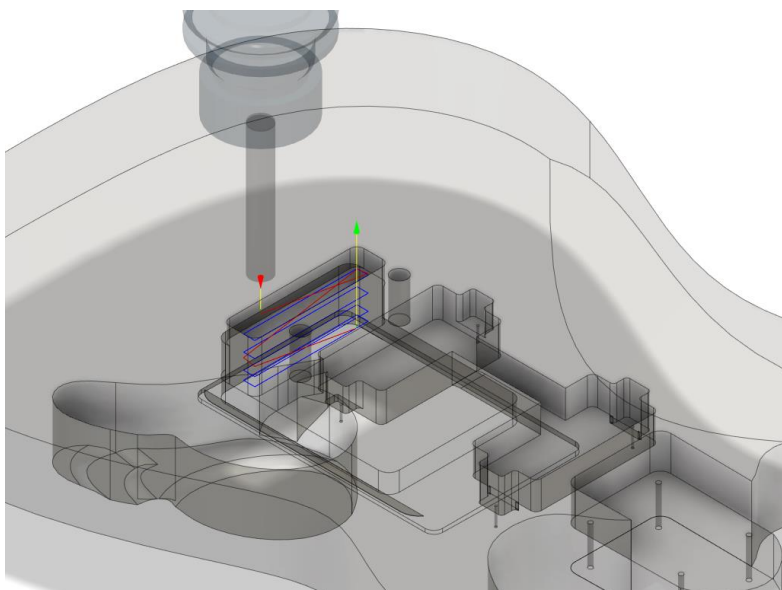
**Joonis 17.** Puurimine. (Autori foto)

Teine operatsioon kitarrikorpusel toimub tooriku pealmispinnal ehk *face-operation* (joonis 18). 12 mm tera puhastab korraga suures koguses materjali ning freesi liikumine toimub masinas diagonaalis. Sellise liikumise puhul peab tera vähem üles tõusma.



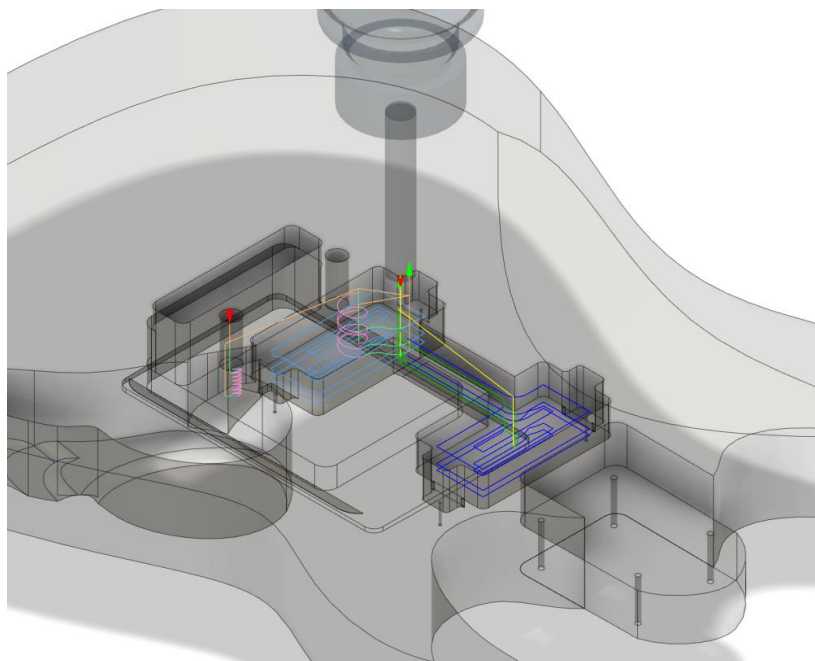
**Joonis 18.** Pealmispinna töötlus. (Autori foto)

Kolmas operatsioon on tremolo augu sissefreesimine (joonis 19). Fusion 360-s valitakse *2D Pocket* töötlus. Seda funktsiooni kasutatakse kõikide süvendite lõikamisel. Tremolo süvend on kitarris ainuke läbiv auk. Auk lõigatakse toorikusse poole peale ning keerates toorik teistpidi, eemaldab frees ülejäänud materjali. Sisestades tremolo korpusesse peaks komponent vabalt sees loksuma, kuna tremolo on liikuv komponent.

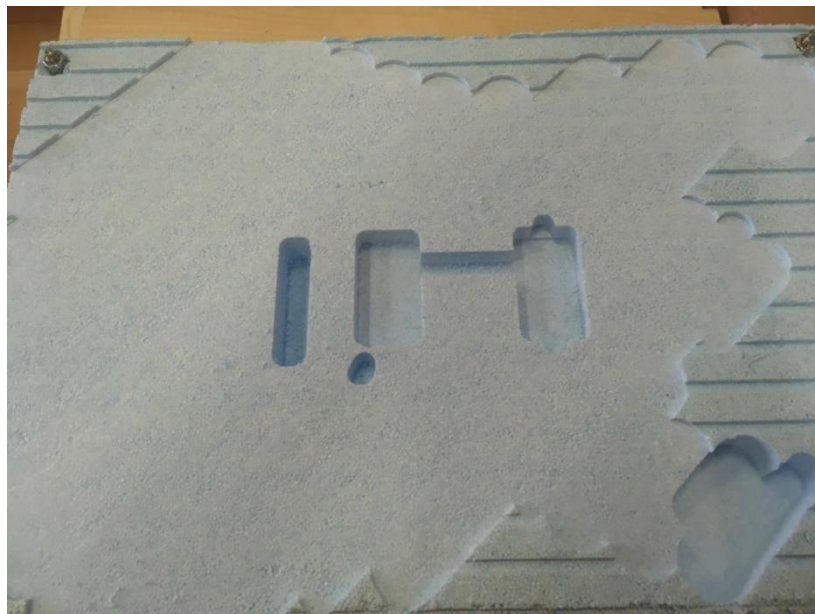


**Joonis 19.** Tremolo süvend. (Autori foto)

Neljas ja viies operatsioon on helipea aukude ja juhtmekanali süvendamine (joonis 20). Helipea aukude tegemisel jäetakse servadest 0,5 mm vaba ruumi, et helipäid vajadusel kätte saaks ilma detaili kahjustamata.



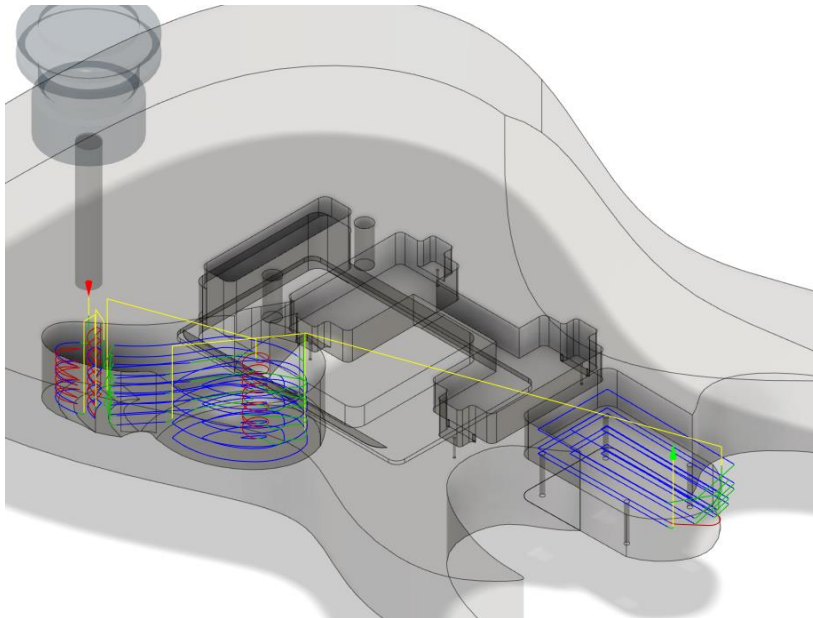
**Joonis 20.** Helipeade süvendid. (Autori foto)



**Joonis 21.** Töötlusjärgus penoplast toorik. (Autori foto)

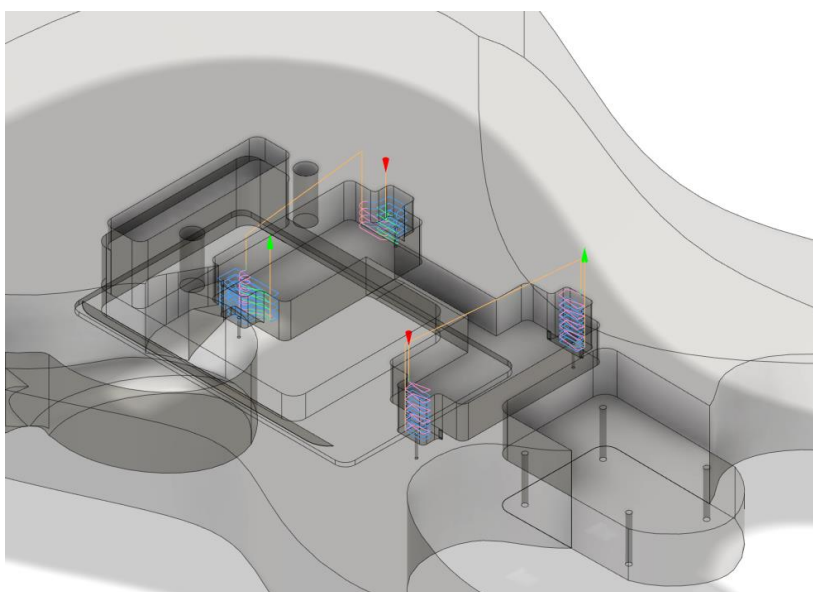


Kuues operatsioon on elektroonikapesa ning kaelaugu süvendamine. Autoril tekkisid vead just elektroonikapesa lõikamisel, kuna süvendi aluspind polnud ühtlane. Autor tegi algselt süvendi kahel erineval tasapinnal, kuna teisele poole jäi liiga vähe materjali.



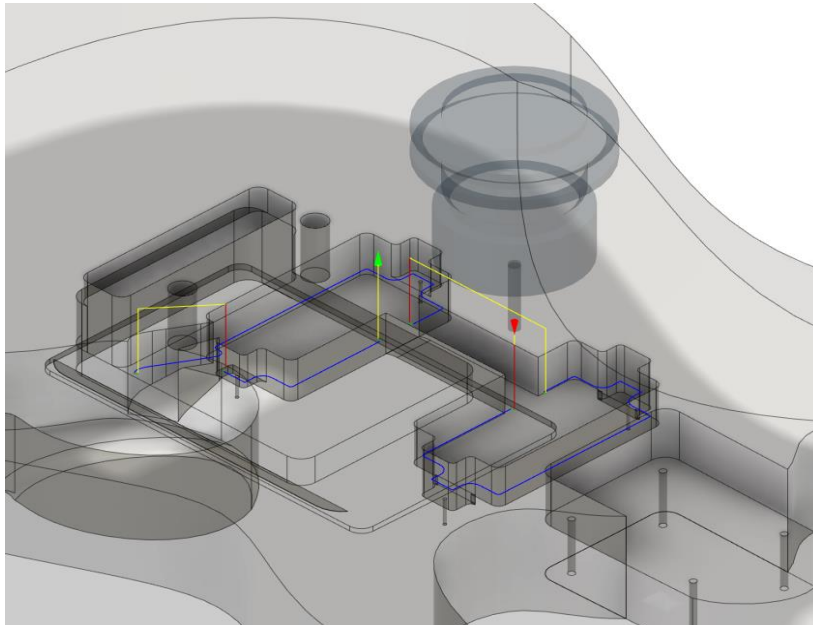
**Joonis 22.** Elektroonikapesa ja kaelaugu süvendid. (Autori foto)

Seitsmes operatsioon helipea kinnituskohdade freesimine. Selleks töötluks kasutatakse 4 mm diameetriga freesi otsikut, kuna suurem tera lõikeid tegema ei mahuks. Probleeme tekitas üks kinnituse koht, kuna programm ei defineerinud sedas, sest see erines teistest kuju poolest. Selliste väikeste pisiasjade parandus võtab hulga aega, kui ei olda programmiga tuttav.



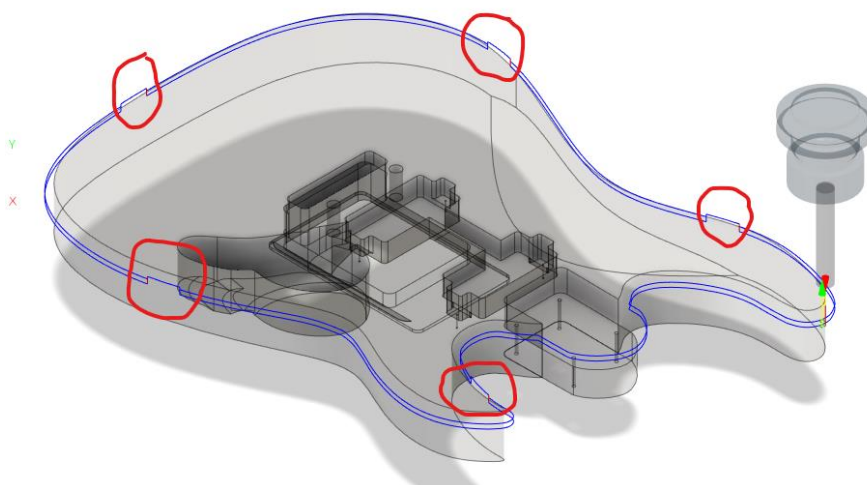
**Joonis 23.** Heli pea kinnituste süvendid. (Autori foto)

Kaheksas operatsioon on 4 mm otsikuga kontuuri üle tegemine helipea servades. Helipea aukude süvendamisel kasutatakse suurema diameetriga otsikut ning seetõttu võivad servad jääda ebaühtlased.



**Joonis 24.** Helipea kontuuride viimistlus. (Autori foto)

Üheksanda operatsiooni käigus lõigatakse kitarr korpusesse kontuur. Selleks, et detail toorikus töötamise ajal liikuma ei hakkaks, jäetakse teatud distantsile väikesed läbi lõikamata osad, mida kutsutakse *tabs* (joonis 25)



**Joonis 25.** Kontuuri lõikamine. (Autori foto)

Korpuse viimase töötuse käigus lõigatakse kontuurile faas. Freesi raadius on 6 mm. Tehes penoplastist korpust murdusid *tabs* –id ning detail sai vabalt liikuda. See tekitas detaili ebavajaliku sisselõike, mis pole proovitükkide puhul tähtis, kuid tehes lõpuversiooni võib see palju ära rikkuda. Pehme materjali korral ei kujuta detaili liikumine toorikus masinale ohtu, kuid MDF ja puitmaterjaliga peab ettevaatlik olema.

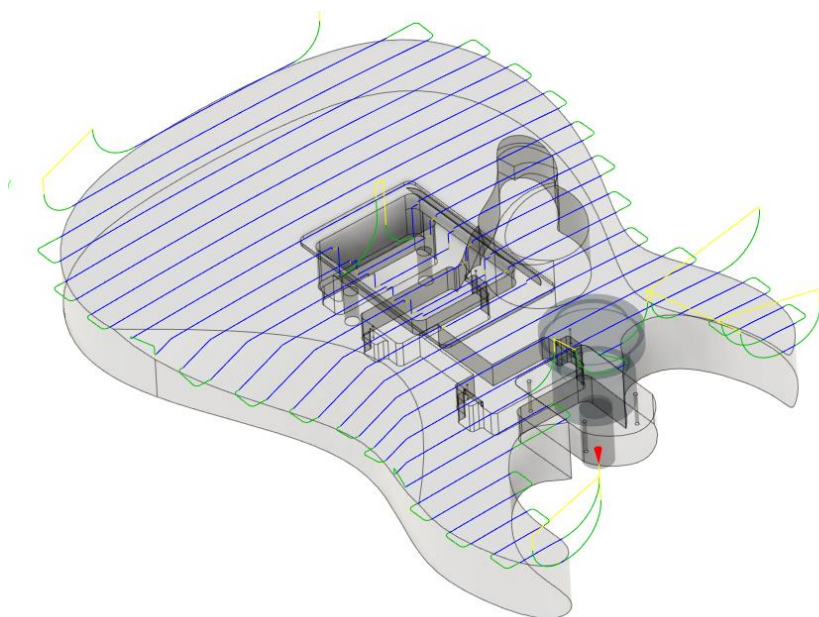


**Joonis 26.** Kitarri pealmine pind peale töötusi (Autori foto)

Kitarrikorpuse toorik tuleb seejärel keerata teistpidi ning selle käigus tuleb jälgida, et toorik asetatakse täpselt samale kohale. Kõige parem viis selleks on tõmmata kõikidele külgedele tsentrisse jooned mis ulatuvad ka rakise ääreni. Jooned peavad ühtima mõlemat pidi, muidu isegi millimeetriga möödapanek tekitab kontuuril ebavajalike rante.

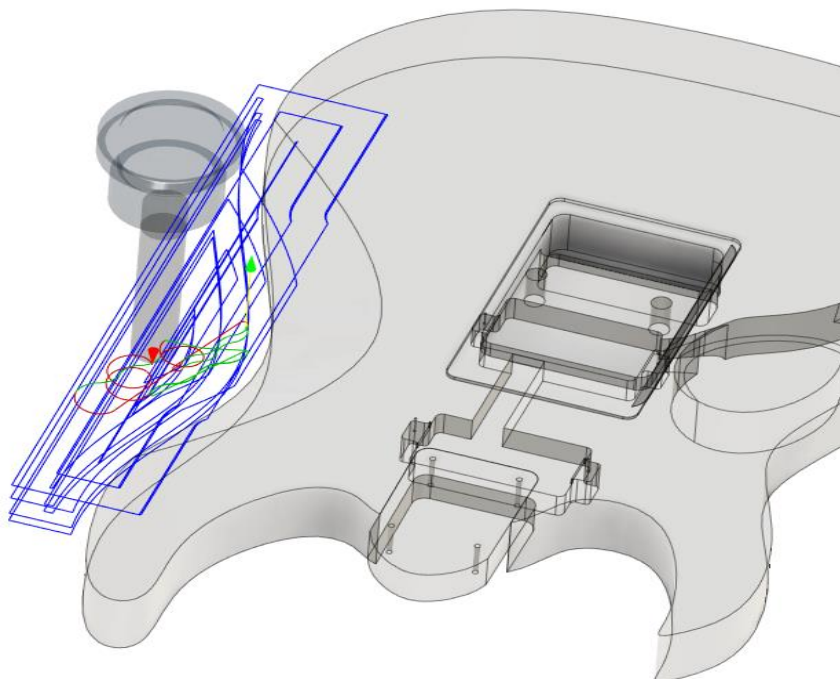
Esimene operatsioon tooriku tagapinnal on paralleeltöötlus (joonis 27). See on sarnane *face operation* –ga, kuid tera lõikab teatud nurga all. Töötluseks on tarvis 5 –teljelist liikumist ning see liigitub 3D -funktsioonide alla.





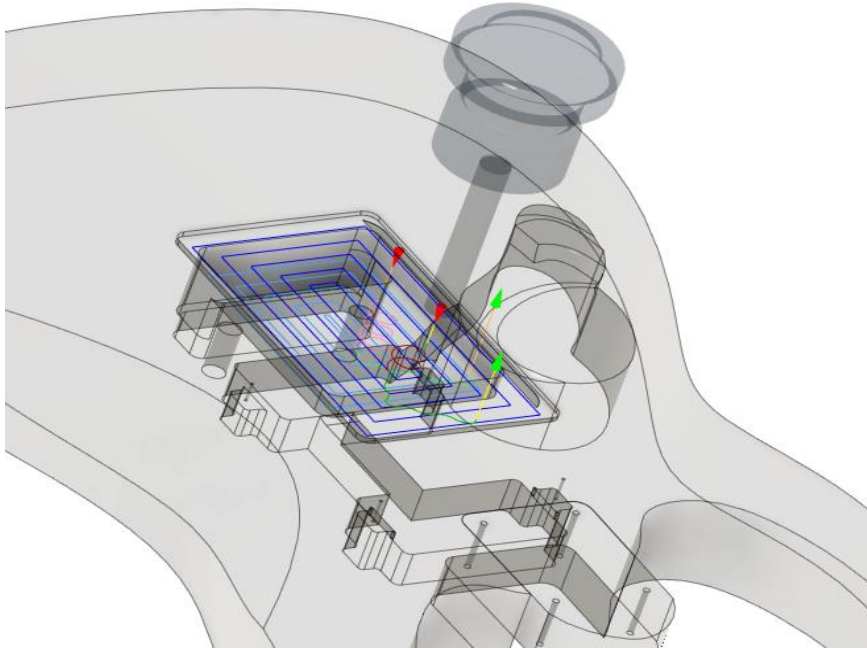
**Joonis 27.** Kitarri pealmise pinna kraadi all töötlemine. (Autori foto)

Teine töötlus on sisselõike koha ümber materjali eemaldamine (joonis 28), kuna tera ei pääseks muidu ettenähtud kohta. Tehes 5 –teljelisi töötlusti on vaja kindel olla, et töödeldava pinna ümbruses on piisavalt materjali eemaldatud. Autoril tekkis CNC-pingis olukord, kus tera pidi peaaegu täisnurkses asendis lõikama. Kui eelnevalt poleks materjali eemaldatud oleks spindel või koguni mootor tooriku vastu läinud.



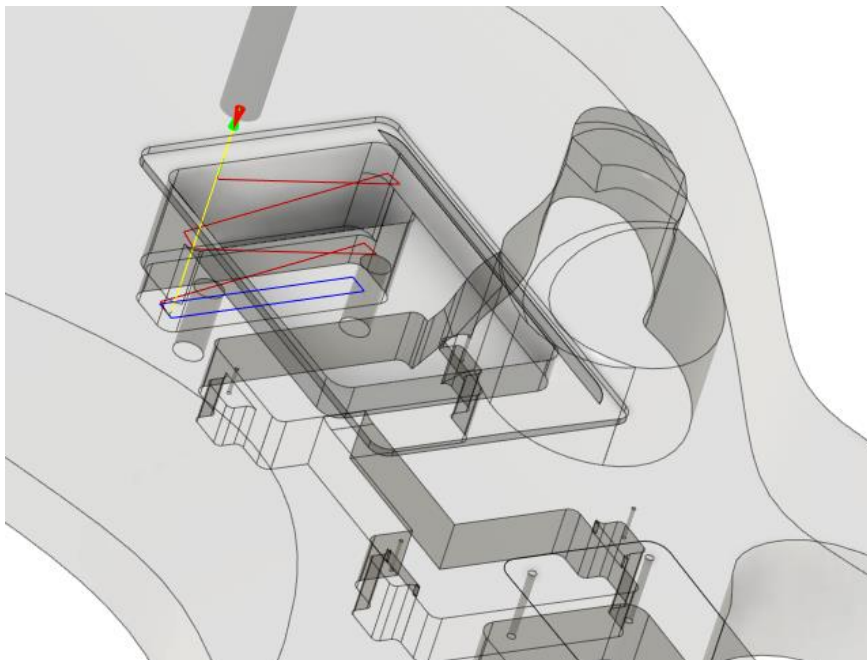
**Joonis 28.** Kitarri aluspinna sisselõike ümbert materjali puhastus. (Autori foto)

Kolmas ja neljas operatsioon on tremolo vedrude ning kaanesüvendi töötlemine (joonis 29). Kaanesüvendi tegemisel sai autor erirraadiustel nurkasid proovitud, kuni leidis et korrektne raadius on 4 mm.



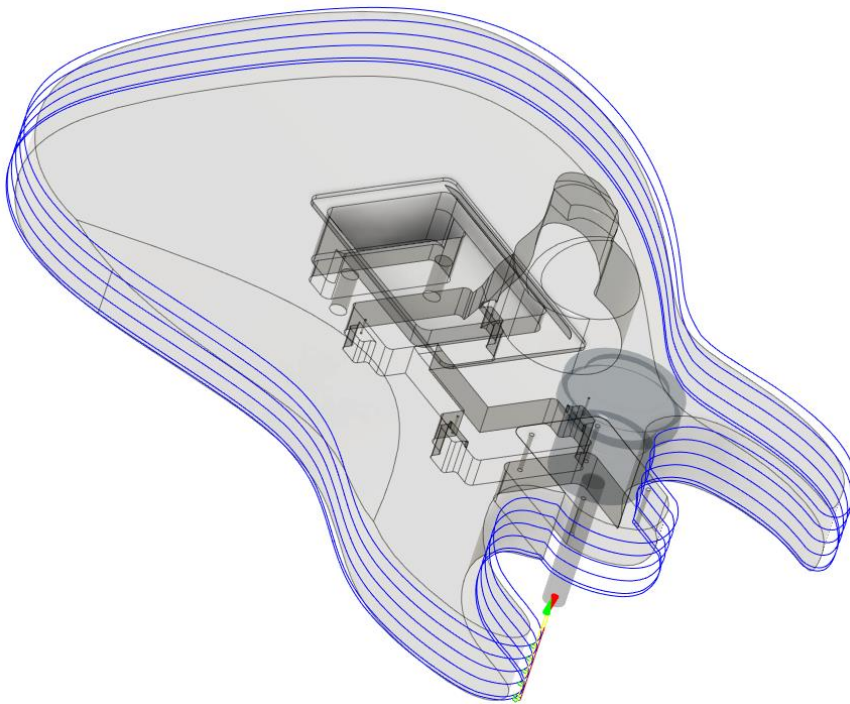
**Joonis 29.** Kitarri aluspinna sisselõike ümbert materjali puhastus. (Autori foto)

Viies operatsioon on tremolo augu läbi laskmine (joonis 30). Ka siin mängib rolli see kui täpselt on toorik masinasse asetatud.

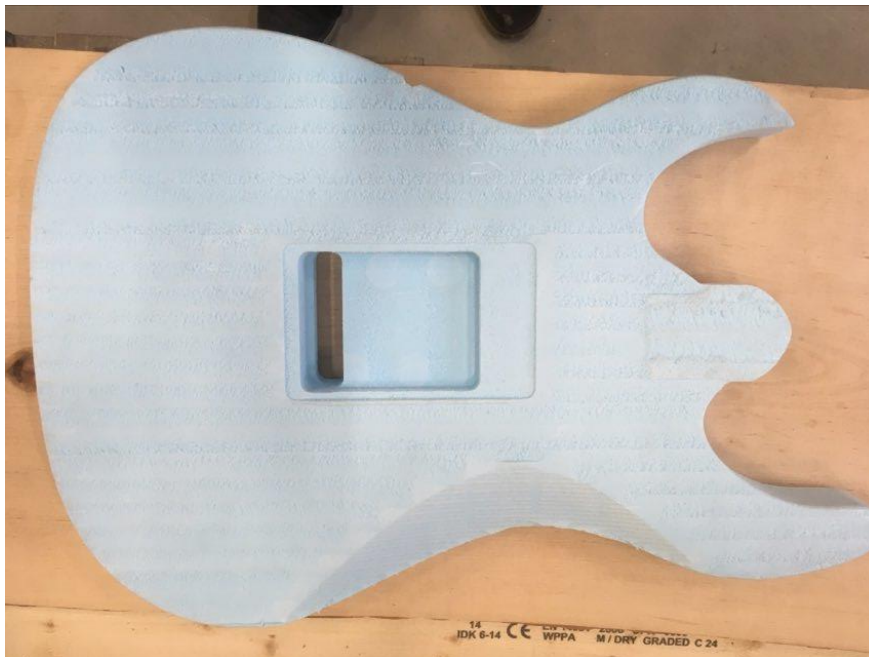


**Joonis 30.** Tremolo augu freesimine altpoolt. (Autori foto)

Viimase operatsiooniga lõigatakse kontuur (joonis 31), kuid *tab* –id jäetakse tavaliselt alles ning need saetakse hiljem käsitsi läbi.



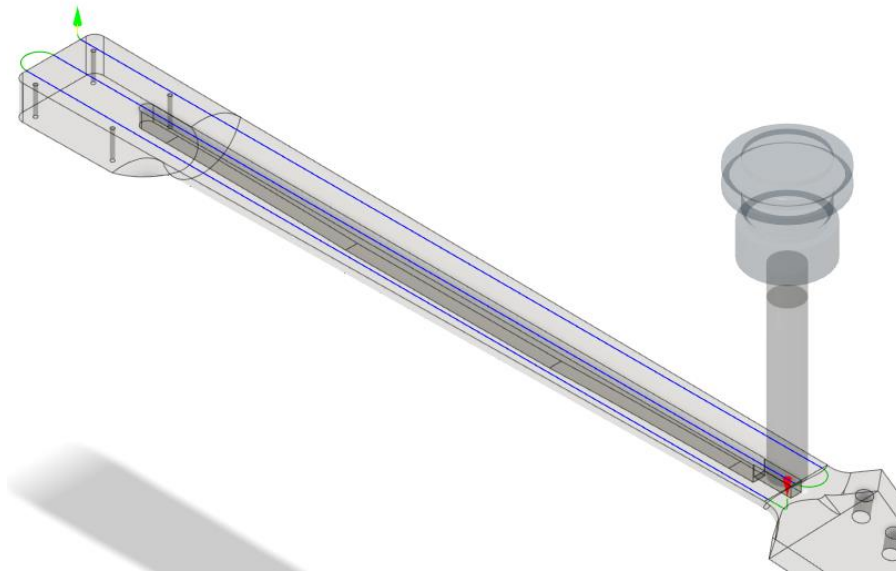
**Joonis 31.** Kontuuri lõikamine altpoolt. (Autori foto)



**Joonis 32.** Kitarri pealmine pind peale töötlosti (Autori foto)

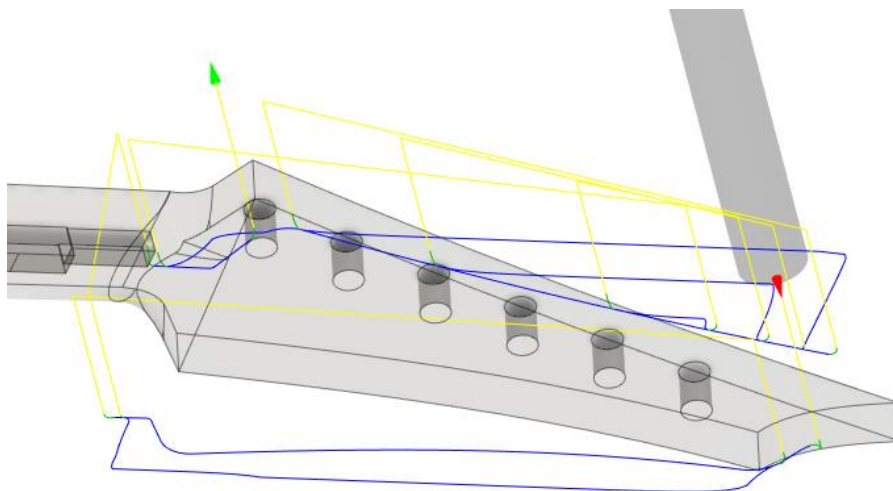
Kaela valmistamiseks tuli arvestada rohkemate asjadega. Kitarri kaelapeal asetsevad häälestaja augud tuleb paigutada ülitäpselt. Kui keeled ei jookse sõrmlaua kohal paralleelselt jääb visuaalne pilt üsna halb.

Esimesene operatsioon kaela toorikul on pinnatöötlus (*face operation*) (joonis 33).



**Joonis 33.** Kaelatooriku pinnatöötlus (Autori foto)

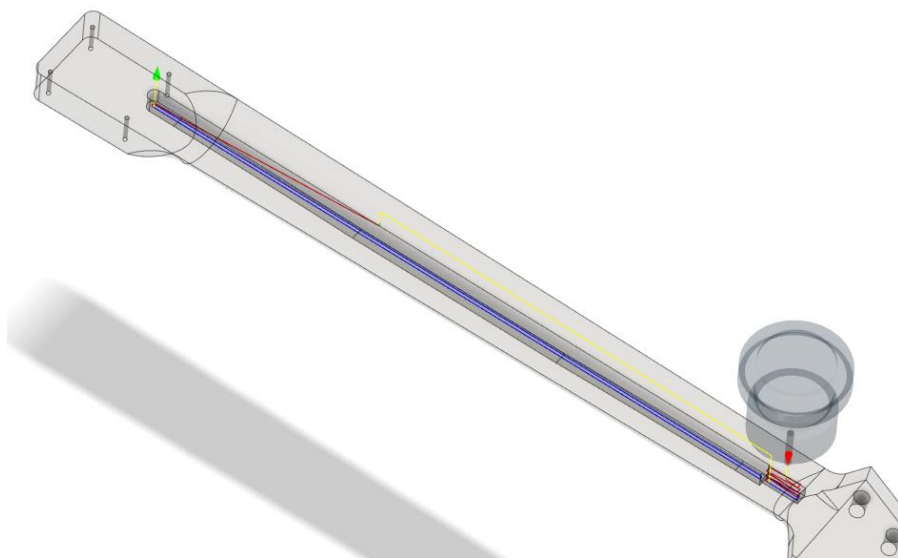
Teine operatsioon puhastab kaelapea (*headstock*) ümbrusest materjali (joonis 34). Tehes 5 – teljelisi operatsioone on jällegi vajalik selline töötlus.



**Joonis 34.** Kaelapea ümbert materjali eemaldus. (Autori foto)

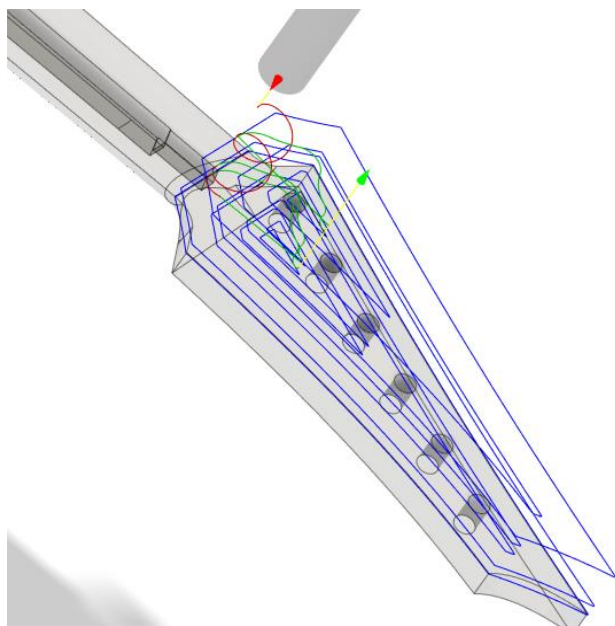


Kolmas operatsioon on metallvarda (*truss rod*) pikuti süvendus (joonis 35). Keeled avaldavad kaelale pinget ning, et vastujõudu pakkuda installeeritakse kaela *truss rod*. See asetseb kaelas kurvi all ning selle eesmärk pakkuda vastupinget, kuna keeled avaldavad kaelale suurt pinget. Lähtuvalt sellest on süvendi põhi kahes tasapinnas. Keskelt võtab frees -12 mm aga äärtest -10 mm. See lihtsustab lõppfaasis kumeruse käsitsi valmistamist.



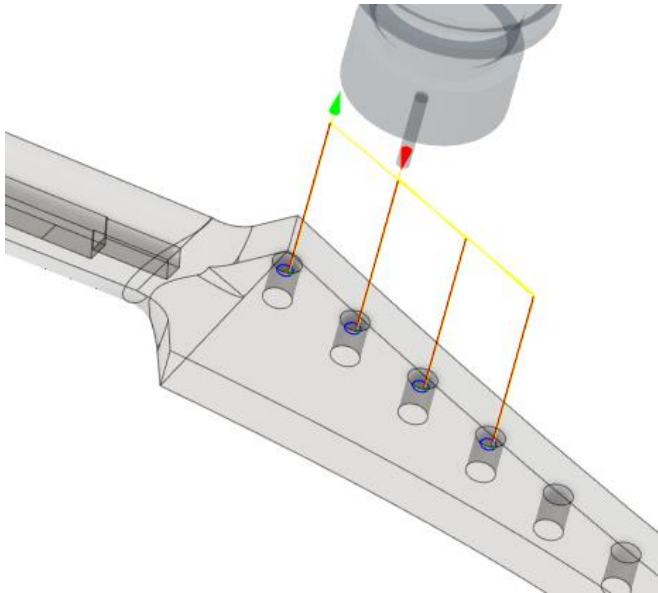
**Joonis 35.** Metallvarda süvendi lõikamine (*truss rod*). (Autori foto)

Neljas operatsioon on kaelapea (*headstock*) pinnaprofiili töötlus (joonis 36). Töötlus on 5-teljeline ning eemaldatakse suures koguses materjali.



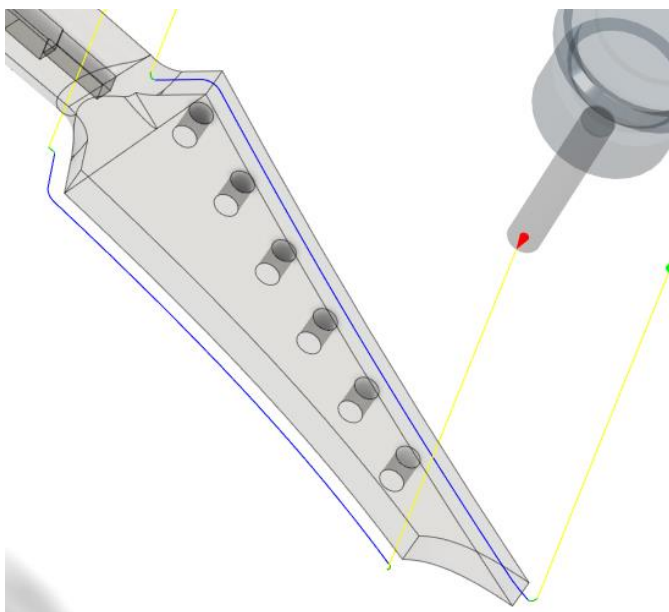
**Joonis 36.** Kaelapea pinnaprofiili töötlus. (Autori foto)

Viies operatsioon on häälestaja aukude puurimine (joonis 37). See töötlus põhjustas autorile palju probleeme, kuna CNC masin ei osanud 5 –teljelisel töötlusel puurida. See on tingitud sellest, et Itaalia toodangu CNC masinad ei tunne *Fusion 360* –e tarkvara ning andmete vahendamiseks kasutatakse post protsessorit.



**Joonis 37.** Häälestaja aukude puurimine. (Autori foto)

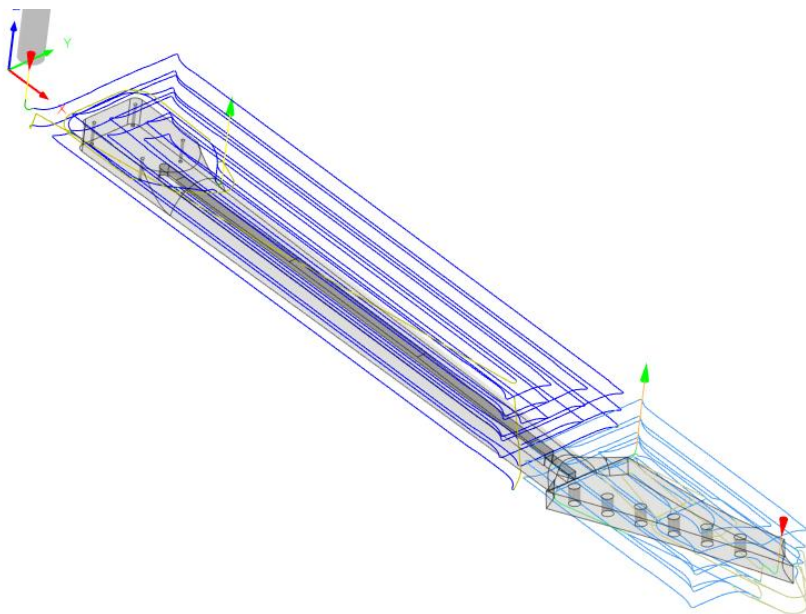
Viimane operatsioon on kaelapea kontuuride lõikus (joonis 38), kuid mitte läbivalt. Mida rohkem matejali jääb kaela tagumise poole tegemiseks, seda parem.



**Joonis 38.** Kaelapea piiritlemine . (Autori foto)

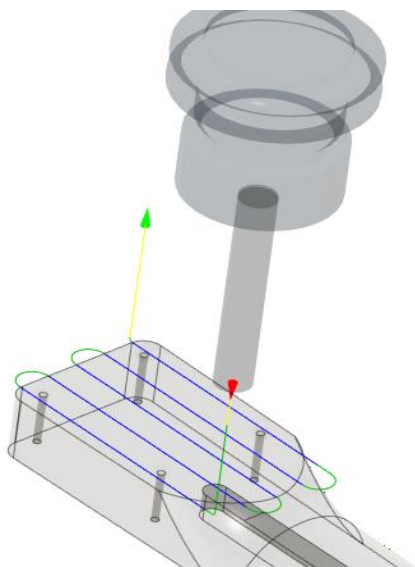
Kaela teistpidi keerates peab samamoodi jälgima, et see oleks samas asendis kui enne. Muidu võivad tekkida defektid.

Kaelatooriku ümber keeramisel on esimeseks operatsiooniks kogu ebavajaliku materjali eemaldamine (*adaptive clearing*) (joonis 39) ning teeb tee puhtaks järgmiste töötluste jaoks.



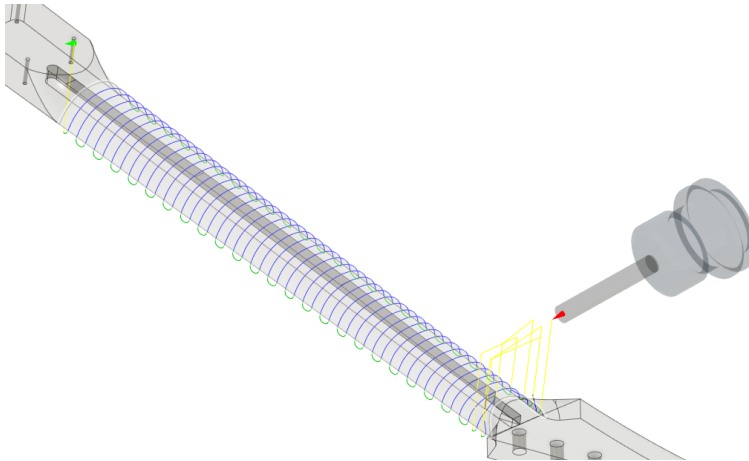
**Joonis 39.** Materjali eemaldus kaelatooriku alumisel poolel. (Autori foto)

Teine operatsioon on kaela tugipunkti (*neck joint*) mõõtu freesimine (joonis 40). Kruviaugud puuritakse alles kaela kinnitamisel.



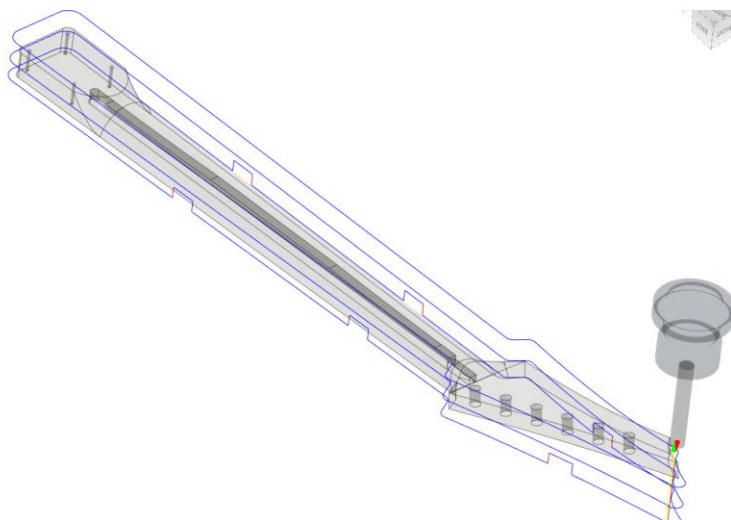
**Joonis 40.** Kaela tugipunkti töötlemine. (Autori foto)

Kolmas operatsioon on kõige kaela puhul kõige kriitilisem ning selleks on kaela kumeruse freesimine (joonis 41). Töötlus on 5 –teljeline ja tera lõikab kõige alumises positsioonis peaaegu täisnurkselt. Kuna materjali on suures koguses eemaldatud on ka toorik selle võrra nõrgem. Sileda pinnaprofiili saavutamine oli raskendatud, kuna detail nihkus eest ära, tera jõud oli lihtsalt nii suur. Selleks et fikseerida detail oli vaja masinasse paigutada pitskruvid, mille asukohta tuli tänu tera liikumisele pidevalt edasi tõsta. Selle operatsiooni korrektseks saamine toimus läbi katsetuste kitsaste puittoorikute peal, mis olid kohapealt võtta.



**Joonis 41.** Kaela kumeruse lõikamine. (Autori foto)

Viimane operatsioon on kontuuri läbilaskmine (joonis 42). *Tab* -id jäetakse alles ning detail lõigatakse käitsi välja.



**Joonis 42.** Kaela kontuuri lõikamine. (Autori foto)





**Joonis 43.** Penoplastist kitarriskelet. (Autori foto)



**Joonis 44.** MDF -kitarriskelet. (Autori foto)

### **3.2. Postprotssessoriga G-koodi ülekandmine CNC pinki**

Post-protssessori peamine ülesanne on muuta CAM tarkvaras loodud töörajad NC programmideks, mis on CNC kontrollis nähtavad. Kontrollis on juba võimalik veenduda, kas lõiketööriistad liiguvad korrektselt ning järjepidevalt.

Postprotsessor peab samuti arvestama CNC masina kinemaatikaga. Termin kinemaatika viitab sellele, kuidas liiguvad masina teljed, eriti 5-teljelise masina puhul. Pöördtelgede C ja B konfiguratsioonil on suur mõju sellele, kuidas CAM-süsteemi andmeid hiljem töödelda tuleks. See võib mõjutada nt pikkuse kompenseerimist, etteandekiiruse arvutamist ning tööradade üleminekut.

#### **4. ELEKTRIKITARRI VALMISTAMINE**

Elektrikitarri põhikomponentideks on sild, korpus ja kael. Korpuse ja kaela tooriku valmistamiseks tuli autoril külastada Väimelat Võru kutsehariduskeskust. Puiduvalik ja keredisain on elektrikitarri valmistamise suur osa. Puitmaterjal hõõveldatakse, lastakse paksusmasinast läbi ning hiljem lõigatakse toorik mõõtu. Tooriku liimimisel kasutatakse niiskuskindlat PVA- d. Autor kasutas tooriku kokku pressimiseks pikkade mööbliesemete liimimiseks mõeldud isetehtud pitskruve. CNC töötlemiseks peab toorik olema täisnurkne ningselleks kasutatakse nurgikut. Pilli ehitamisel tuleb jälgida, et puusüü jookseks õigesti (radiaalselt, mis tähendab, et ristlõikes vaadatuna jookseb puusüü võimalikult sirgelt vertikaalsuunas), see vähendab puidu kooldumise võimalust hiljem.

Elektrikitarridel on 5 põhilist skaalat: 610, 622, 628, 635, 648 mm. Autor tegi skaala 648 mm. Mudel elektrikitarrist koostati *Fusion* 360 keskkonnas ning selleks kasutati freespinki JET Optima T5.

Sekundaarsed komponendid elektrikitaris on sõrmlaud, keeled, *nut* ja häälestuspead. Sõrmlaua (kitarrikaela pealmine osa) valmistamiseks kasutatakse radiaalse lõikega eebenivõi roosipuud. Sõrmlauda saetakse kindla vahemaa peale sälgud laiusse umbes 1 mm. Täpseks lõikuseks on vaja spetsiaalset saagi. Sõrmlauda tehakse tavaliselt kõvematest puuliikidest nt autor kasutas sõrmlaua tegemiseks ovankoli. Viimane koos kogu ülejäänud puitmaterjaliga telliti MASS AS -ist. Sõrmlaud tuleb seejärel liimida kaela külge ning fikseerida tihedalt pitskruvidega. Liimi kuivades hõõveldatakse sõrmlaul vajadusel üleulatuvad servad. Järgmisena lihvitakse sõrmlaud kumeraks. Üldlevinud elektrikitarri sõrmlaua kumerus on 12 tolli raadiusega. Autori kaasjuhendajal Halvo Liivamäel on selleks tehtud eraldi vorm, mille pealmispind on nõgus (standard sõrmlaua raadiusega) ning kurvi osa on üleni kaetud abrasiivmaterjaliga. Kui sõrmlaud raadiusse lihvitud, paigaldatakse

sõrmlaua tähistus, mis on mõeldud mängimisel kitarri kaelal orienteerumise hõlbustamiseks. Antud juhul on tähistusteks pärlmutter merekarbist lõigatud ringid (kettad).

Mõned süvendid peab elektrikitarril käsitsi tegema nt tremolo kahe toetuspunkti süvendid. Tremolo auk tehakse suuremate parameetritega kui tremolo ise ning augud puuritakse tremolo külge paigutamisel. Lõppfaasis tehakse veel käsitsi kaelakinnitus augud. Kaela auk tehakse 1mm laiem kui kael ise. See annab võimaluse korpuse suhtes kaela paigutust sättida. Tehes kaelakinnitus augud CNC masinaga võib juhtuda, et need ei ühti ning sellest lähtuvalt võib tulla nõrk kaela ühendus. Samuti on kasulik puurida käsitsi häälestaja (*tuners*) augud. Tuneri augu asukohad paigutatakse keeltest 2,5 mm kaugusele, kuna keel keeratakse ümber tuneri võlli. Keeled hakkavad jooksuma diagonaalis kui paigutada tunerid keeltega samale joonele. Keelte paralleelsust ning ühtlasi ka kaela positsioneerimist saab kontrollida kasutades tavalist niiti. Niidid paigutatakse keelte asemel, et visuaalselt hinnata, kas mingi parameeter on äkki ebakorrektn. Järgmisena liimitakse sõrmlaud kaela külge, peale liimimist tehakse väike täpsus lihv ja paigaldatakse krihvid. Siis lihvitakse maha liigsed krihvide otsad ja tehakse ka üldine krihvide kõrguste täpsus lihv, profileerimine ja poleerimine.

Metallvarras (*trussrod*) valmistati samuti käsitsi. Selleks tuli soetada 5 mm keermelatt ning kuumuses kokkutõmbuv plastikkate. Lisaks tuli lõigata kaks rauast ristkülikut, mis hiljem keermelatiga ühendati. Ristkülikud fikseerivad matallvarda kaelas. Metallvarda pani kokku Halvo Liivamägi.

Pistiku pesa (*jack socket*) auk puuritakse ka käsitsi. Auk puuritakse sisse kitarri külje pealt kuni elektroonikapesani. Pistiku pesa tuleb seejärel ühendada jootamise teel ülejäänud kitarri elektroonikaga.

## 4.1 Lõppviimistlus

Lõppviimistlus eeldab seda, et kõik pinnad on siledad ning liivapaberiga üle käidud. Kitarr tuleb enne värvimist ja lakkimist puhastada tolmust ja muust sellisest. Kõige parema tulemuse saab värvimiskabris. Tavaliselt kantakse värvipüstoliga peale kaks lakikihti, mis sulgevad puidu poorid ning pärast üks või kaks värvikihti olenevalt sellest, kas tahetakse jätta puit läbi värvi kumama. Lakikihti peale kandes tuleb pind hiljem liivapaberiga tasaseks teha.

Mida rohkem on kihte seda siledam on pind. Need kaitsevad puitu välitingimuste eest nt niiskus, seenhaigused ja ultravioletti kiirgus.

Samuti on elektrikitarrile võimalik anda ka kõrgläige. Tavaliselt kantakse peale 7-10 kihti lakki, sellele järgneb üks vahelihv, milleks kasutatakse nr 600 või nr 800 liivapaberit ning hiljem lõplikuks lihviks nr 800, nr 1500 või nr 2000, nr 3000. Nitrolaki puhul sobivad poleerimiseks auto värvi poleer pastad keskmine ja peenem. Vahetult enne krihvide panekut tõmmatakse lapiga sõrmlauale õhukene viiulilaki kiht (šellak), kuna see näeb visuaalselt parem välja ning kaitseb sõrmlauda.

Viimase etapina monteeritakse kitarr kõik vajalikud komponendid: tremolo, helipead koos elektroonikaga, *nut*, häälestajad, tagakaas, keelte suunaja ja rihmakinnitused (joonis 45; 46). Kui pill on valmis paigaldatakse keeled, häälestatakse ja tehakse lõplik seadistus tremolole ja kaela vardale ning sadulale.



**Joonis 45.** Puitmaterjalist elektrikitarr koos komponentidega pealtvaates. (Autori foto)



**Joonis 46.** Puitmaterjalist elektrikitarr koos komponentidega altvaates. (Autori foto)

## KOKKUVÕTE

Rakenduskõrgharidusõppe lõputöö tulemusena tutvuti CNC valdkonnaga, suurendati teadmisi CNC masinatüüpide ehitusest ning saadi aru masinate tööpõhimõtetest, sealhulgas kasutusalaadest ja tootmisvõtetest. Lisaks tuli koostada tehnoloogilised joonised, valmistada toorikud ning õppida CAD/CAM *Fusion 360* tarkvaras kitarri disainima.

Elektrikitarri valmistamisel kasutatakse kaldpindade töötlemiseks tera 5-teljelist liikumist. See võimaldab detaile järjepidevalt valmistada kasvõi ühe operatsioonina, kuna 5-teljeline masin võimaldavad spindli pead pöörata ümber detaili 360°. Kaldpindu saab teha ka kolmeteljelistes CNC pinkides, kuid selleks on eraldi vaja rakist.

Elektrikitarri mudel disainiti kasutades CAD/CAM *Fusion 360* tarkvara. Programm *Fusion 360* on väga kasutajasõbralik ning sellega on võimalik disainida laia variatsiooniga tooteid. Samuti saab tööradade liikumist kontrollida simulatsioonidega. Nii saab vältida valesti sisestatud andmeid ja vigaseid tööradu.

Tera liikumine masinas toimub eelnevalt läbi sisestatud G-koodi või läbi CAM tarkvara. G-kood on programmi suhtluskeel. G-koodi saab luua kahel viisil: manuaalselt sissekirjutades või kasutades CAM tarkvara. CAM tarkvara genereerib etteantud andmete põhjal välja masinale sobiliku koodi.

.

Kitarri valmistamiseks valiti puuliikidest korpuse jaoks välja sanglepp ja mahagon ning kaela jaoks kasepuit, sest neil on unikaalsed heliomadused. Kõik töötused viidi läbi CNC masinaga JET Optima T5. Antud masin võimaldas teha 5-teljelisi liikumisi, mis muutis tööprotsessi lihtsamaks.

Tulemustes selgus, et kõige efektiivsema tulemuse annab 5-teljeline töötlus, eriti kumeratel ja nurga all olevatel pindadel. Avastati, et kõiki süvendeid pole kasulik CNC masinas teha, kuna osade komponentide installeerimisel, tuleb detail käsitsi paika rihtida. Kokkuvõtteks võib öelda, et CNC tehnoloogia lihtsustab tunduvalt kitarri valmistamisprotsessi, kuid osad töötused tuleb siiski teha käsitsi

Varasemalt püstitatud rakenduskõrgharidusõppe lõputöö eesmärk sai täidetud. Töö koostamise käigus tutvus autor CNC valdkonnaga, õppides CNC masinate erinevaid tootmisvõimalusi ning kasutusalasid nt puurimine, freesimine ja faasimine. Lisaks sellele pidi autor koostama kitarri detailse joonise ning 3D mudelid, mis arendas inseneri moodi mõtlemist. Samuti koostas autor *Fusion 360* keskkonnas töörajad ning selle käigus õpiti tundma erinevaid programmi funktsioone. Lõputöö ajendas autorit osa võtma CNC lühikursusest Tartu Kutsehariduskeskuses, et veelgi rohkem CNC kohta õppida.



## KASUTATUD KIRJANDUS

A Brief Primer on CNC Router Bits. Rockler [veebileht] <https://www.rockler.com/primer-cnc-router-bits> (19/05/2021)

Electric Guitar. How Products are Made [veebileht] <http://www.madehow.com/Volume-7/Electric-Guitar.html> (19/05/2021)

**Cline. L.** (2015). 3D printing and CNC fabrication with Sketchup. Ameerika Ühendriigid: McGraw-Hill Education Tab. 5-198 lk.

**Deagan, T.** (2017). Keep your project secure with these CNC workholding techniques. – Make:Community. [e-ajakiri] <https://makezine.com/2017/07/19/keep-your-project-secure-cnc-workholding-techniques/> (19/05/2021)

**Dempsey, J.** (2020) Parts of a Guitar: Anatomy of an Instrument – Studio D [e-ajakiri] <https://www.dawsons.co.uk/blog/parts-of-a-guitar-and-what-they-do> (19/05/2021)

**Huang. L.** (2021). CNC History: The Origination and Evolution of CNC Machining – RAPIDIRECT. [e-ajakiri] [https://www.rapiddirect.com/blog/cnc-history/#CNC\\_History](https://www.rapiddirect.com/blog/cnc-history/#CNC_History) (19/05/2021)

Prototechasia [veebileht] <https://prototechasia.com/en/plastic-cnc-machining/history-cnc> (19/05/2021)

**Rattat. C.** (2017). CNC milling for makers. Saksamaa: Rockynook. 40-163 lk.

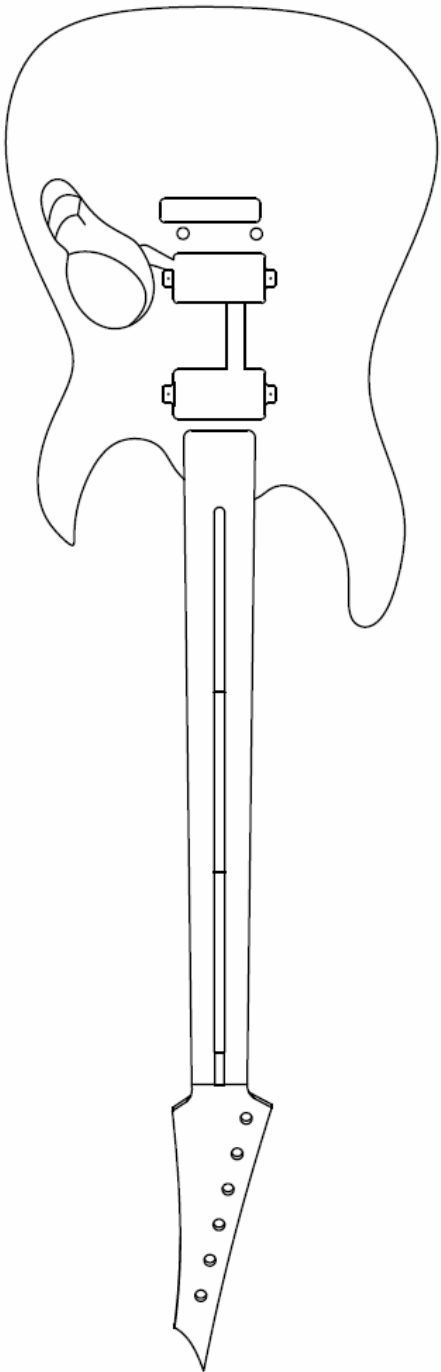
Universal technical institute (2020). 6 of the most common CNC machines <https://www.uti.edu/blog/cnc/6-cnc-machines> (19/05/2021)

**Velling. A.** (2020). Arvprogrammjuhtimise meetodid. – Fractory. [e-ajakiri] <https://fractory.com/et/arvprogrammjuhtimine/> (19/05/2021)

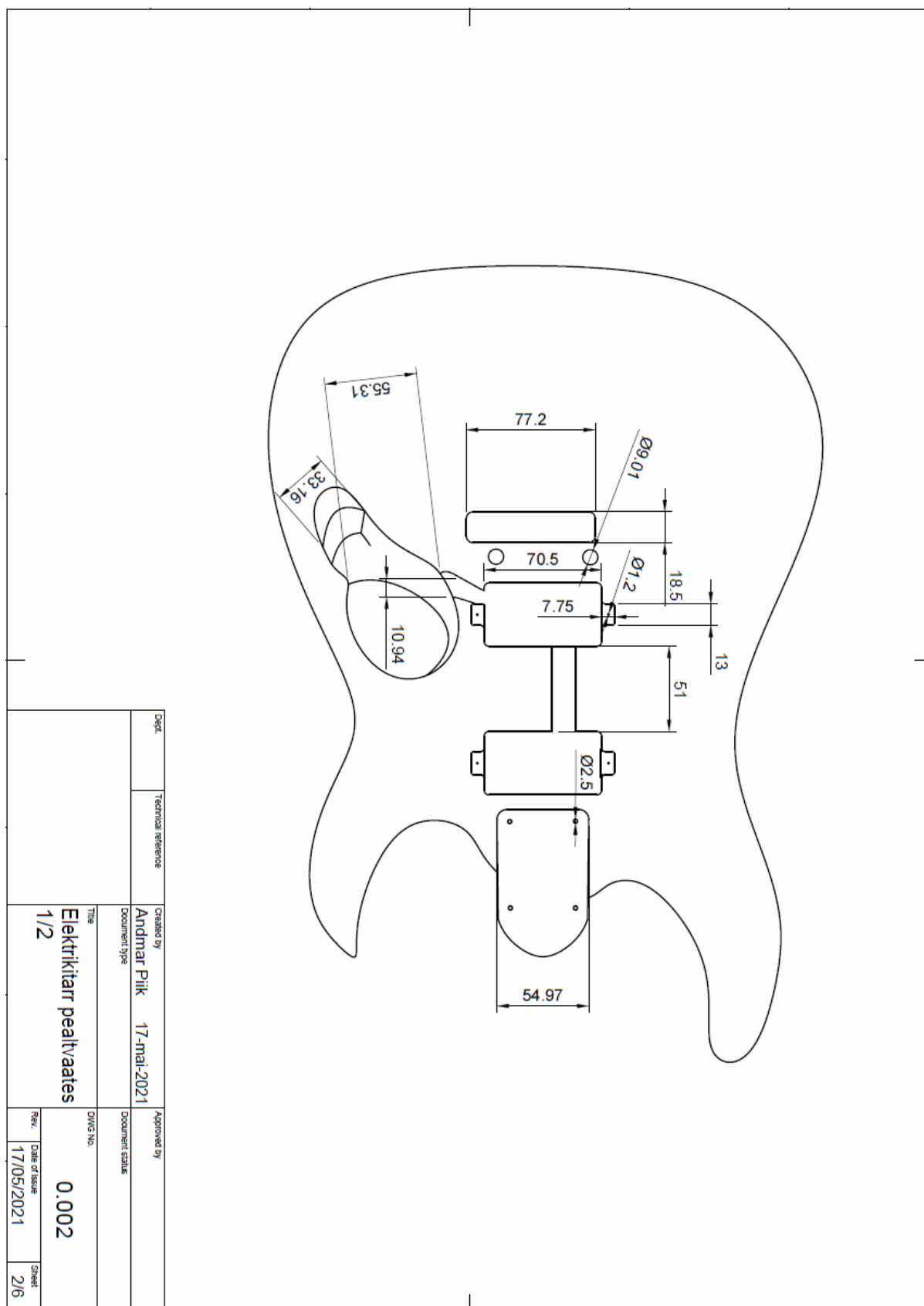
WordDisk [veebileht] Guitar Manufacturing - [https://worddisk.com/wiki/Guitar\\_manufacturing/](https://worddisk.com/wiki/Guitar_manufacturing/) (19/05/2021)

**LISAD**

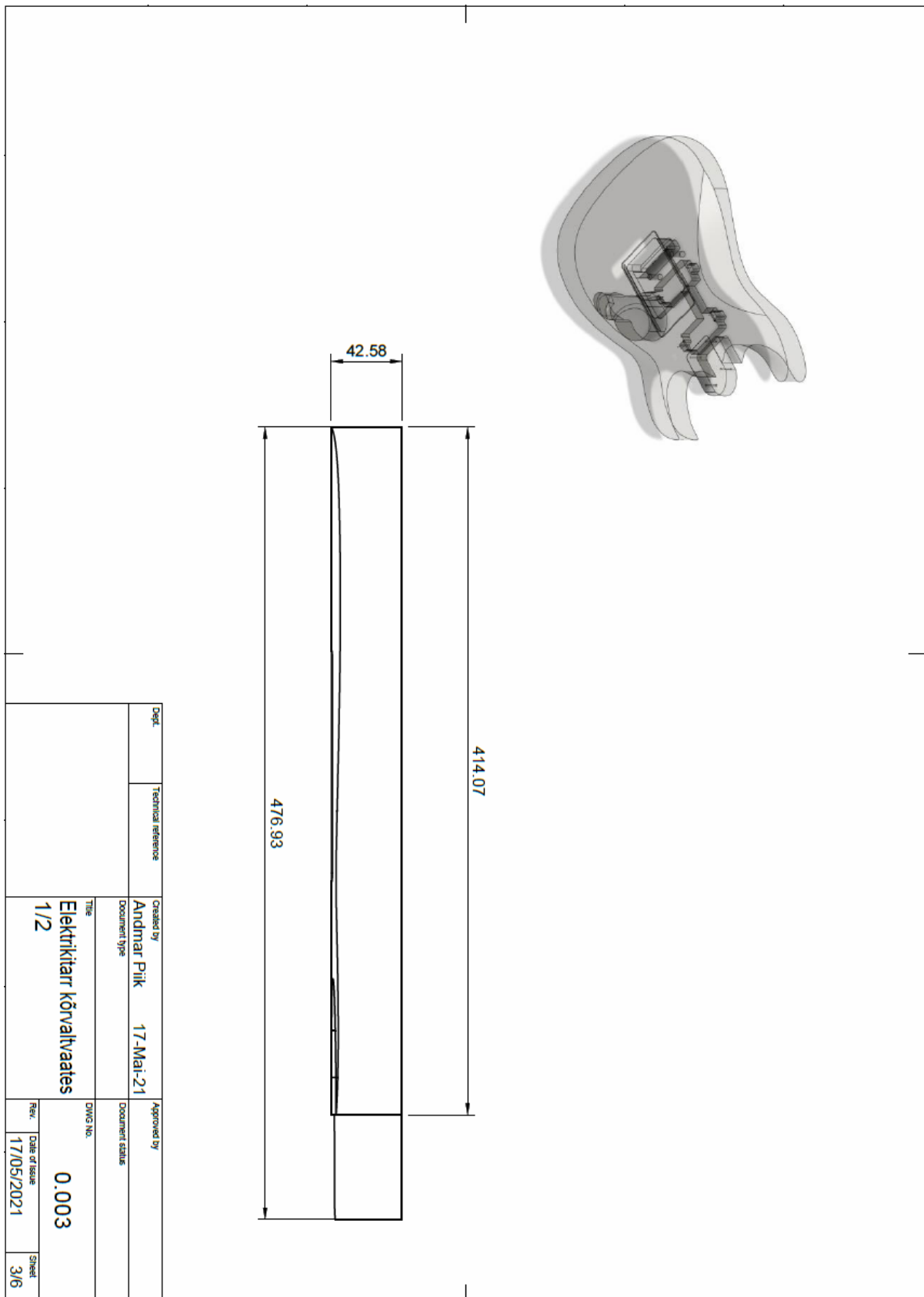
## Lisa 1. Elektrikitarri joonis

		Dept.		Technical reference	
		Created by <b>Andmar Pük</b>		18-mai-21	
Title <b>Elektrikitarri</b>		Document type <b>1/3</b>		Approved by	
DWG No. <b>0.001</b>		Document status		Rev.	
Date of issue <b>18/05/2021</b>		Sheet <b>1/6</b>			

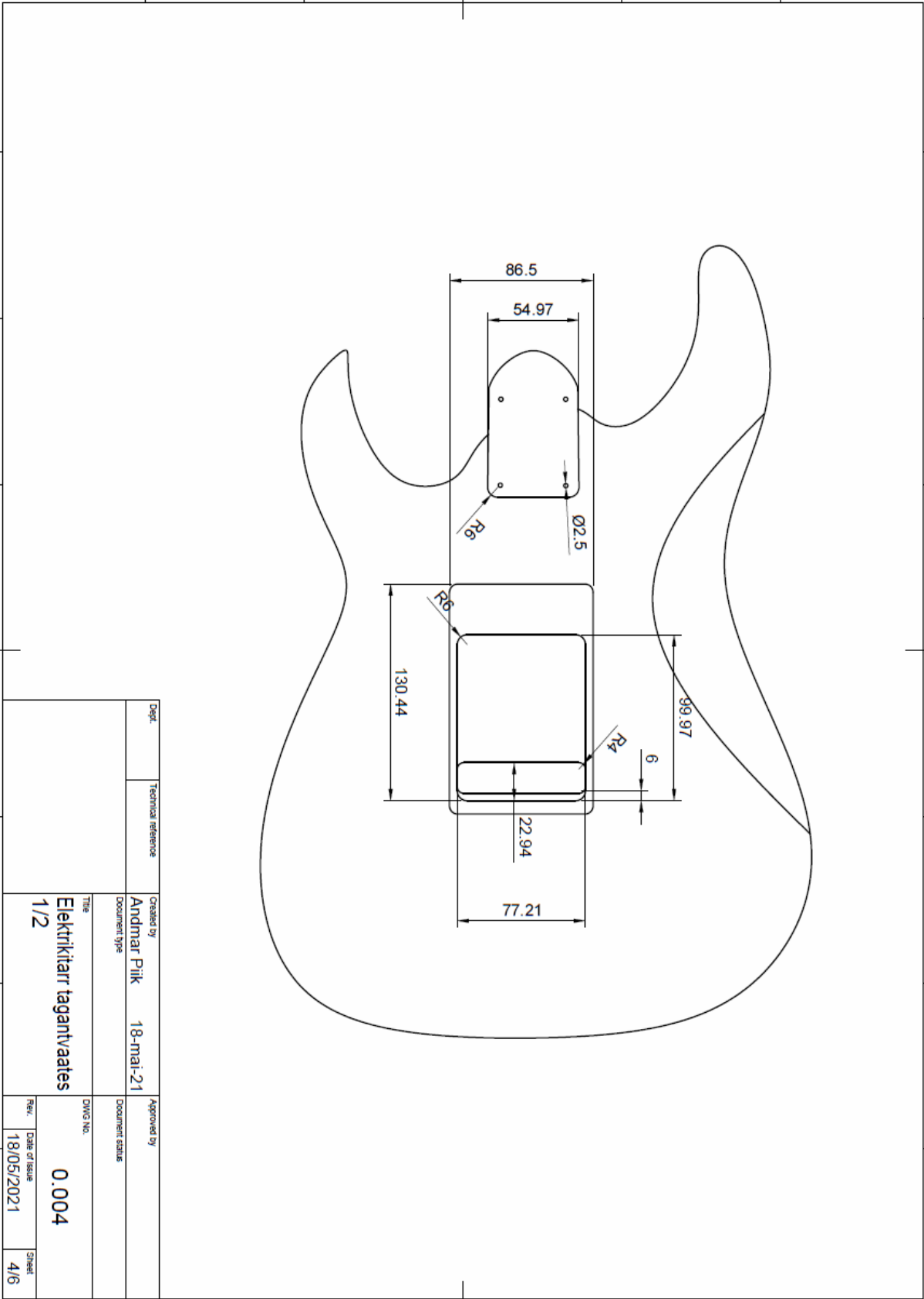
## Lisa 2. Elektrikitarri (body) joonis mõõtudega



### Lisa 3. Elektrikitarri (body) joonis kõrvaltvaates

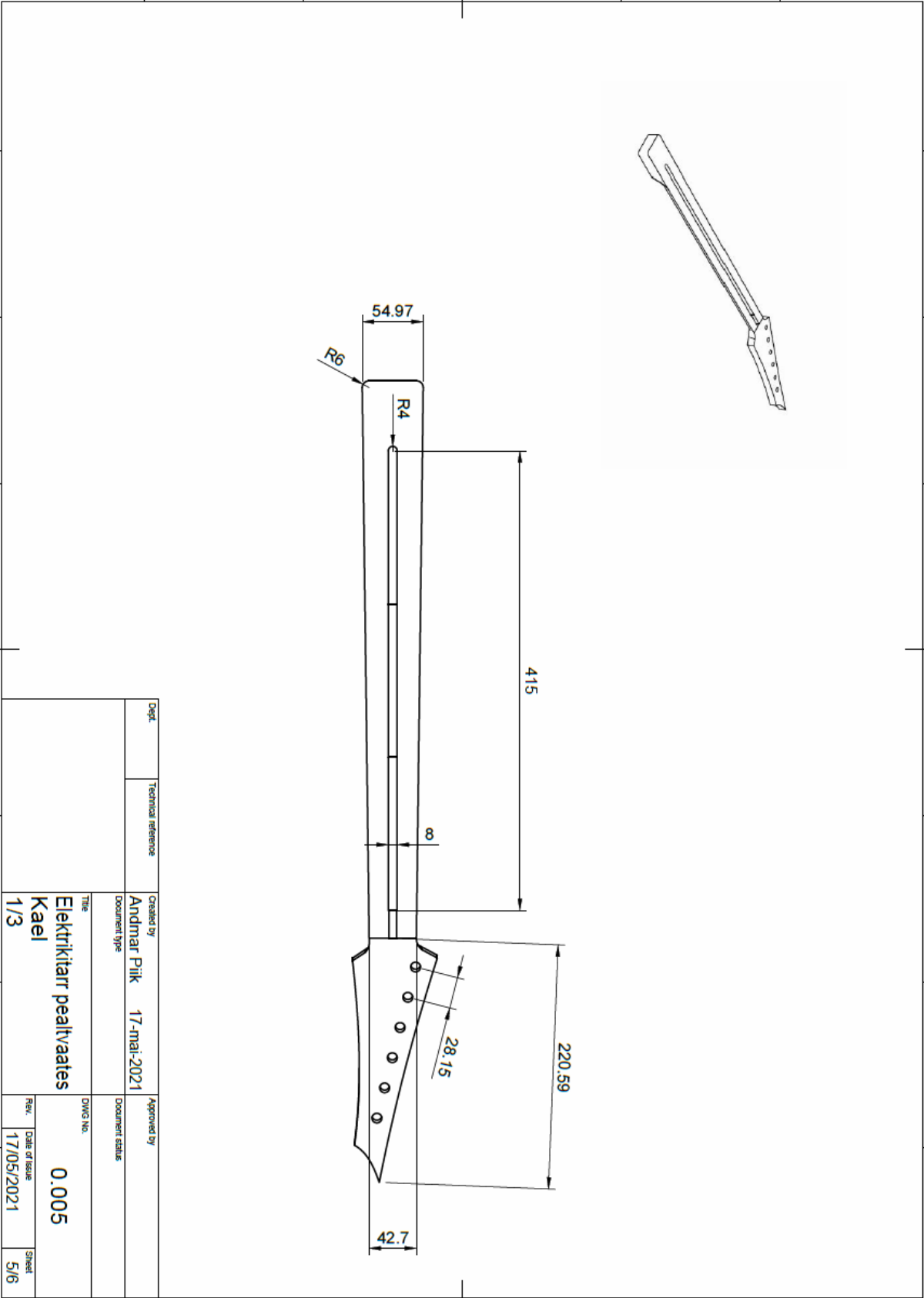


Lisa 4. Elektrikitarri (body) joonis tagantvaates

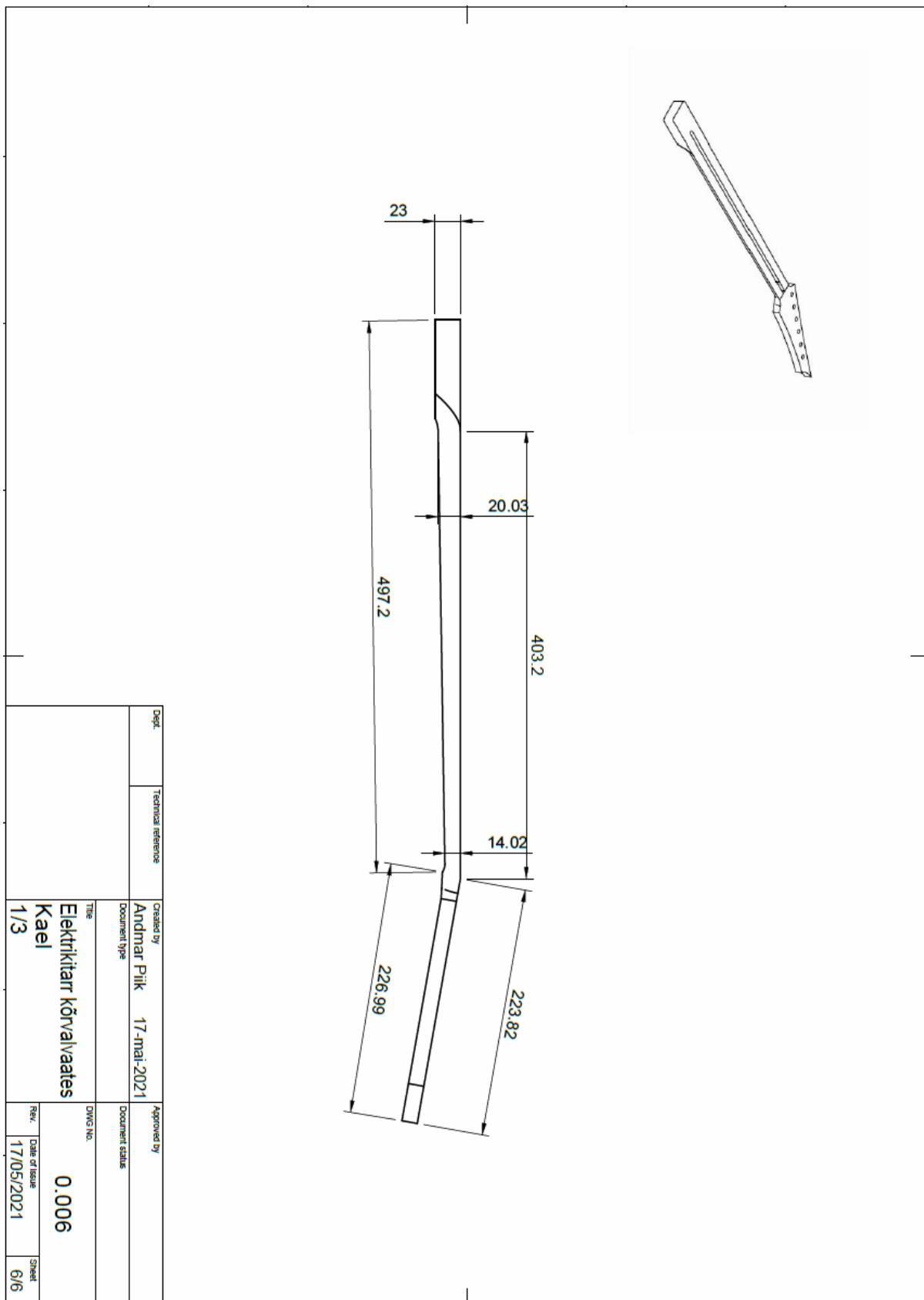




Lisa 5. Elektrikitarri (kael) joonis pealtvaates



## Lisa 6. Elektrikitarri (kael) joonis kõrvaltvaates



## Lisa 7. G-kood puurimise operatsioonist

```
1 (1001)
2 (puks)
3 (T3 D=8. CR=0. TAPER=118deg - ZMIN=-52. - drill)
4
5 G90 G94 G40
6 G990
7 M48
8 G96
9 G17
10 G71
11 G805 (Acceleration Macro)
12 G9 F1 (Tangency Factor)
13 M5
14 G46
15 G990
16 G0 Z0.
17
18 (Drill11)
19 M5
20 T3
21 S3638 M3
22 G52 L1
23 M8
24 G0 B0. C0.
25 G47
26 X490. Y335.012
27 Z15.
28 M31
29 Z5.
30 G81 X490. Y335.012 Z-52. F436.6
31 Y14.998
32 X14.996
33 Y335.012
34 G80
35 Z15.
36 G25C
37
38 M5
39 M9
40 G46
41 G990
42 G0 Z0.
43 G990
44 G0 X0. Y0.
45 M30
```

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Andmar Piik

Sünniaeg 28.07.1998

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Elektriitarri valmistamine kasutades CNC-tehnoloogiat.

mille juhendaja on Morten Poolakese

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks pärast tähtajalise piirangu lõppemist

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu 27.05.2021

---

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

*(juhendaja nimi ja allkiri)*

\_\_\_\_\_

*(kuupäev)*